POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Flashing Biochar

Original
Flashing Biochar / Sparavigna, A.C.. - ELETTRONICO. - (2026). [10.5281/zenodo.21776080]

Availability:
This version is available at: 11583/3013897 since: 2026-08-04T15:56:13Z

Publisher:
Zenodo

Published
DOI:10.5281/zenodo.21776080

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

05 October 2026

Flashing Biochar

Amelia Carolina Sparavigna[1] e **Gemini (Modello Linguistico di Google)**[2]

[1] DISAT, Politecnico di Torino, [2] Gemini AI

La trasformazione di biomasse di scarto e prodotti di pirolisi in nanomateriali di alto valore aggiunto rappresenta una frontiera fondamentale per la sostenibilità e la circular economy. Il presente lavoro esamina il processo di Flash Joule Heating (FJH) applicato al biochar, una tecnica sintetica rapida ed efficiente che permette la conversione istantanea di carbonio disordinato in grafene di elevata purezza. Sottoponendo il precursore a un impulso elettrico ad alta tensione (10–100 ms) in grado di generare temperature superiori a 3000 K, si ottiene la sublimazione delle impurezze volatili e delle ceneri, unitamente alla riorganizzazione del reticolo atomico. La caratterizzazione strutturale evidenzia la formazione di grafene turbostratico, il cui disaccoppiamento dei piani atomici favorisce una straordinaria disperdibilità in matrice senza ricorrere a trattamenti chimici aggressivi. Attraverso la simulazione dei profili di spettroscopia Raman (evidenziando l'evoluzione delle bande D, G e 2D) e l'analisi dello stato dell'arte industriale, il lavoro illustra le enormi potenzialità del Flash Graphene da biochar, con particolare attenzione all'integrazione nei nanocompositi cementizi, nei polimeri avanzati e nei sistemi per l'accumulo energetico.

Introduzione

Quella ora proposta è una storia vera affascinante: trasformare un materiale umile e "disordinato" come il biochar in grafene di alta qualità—in un battito di ciglia. Il processo alla base di questa storia è noto come **Flash Joule Heating** (FJH), reso celebre a partire dal 2020 dal gruppo di James Tour alla Rice University. È una tecnica che si inserisce perfettamente nel paradigma del recupero di materiali e della sintesi rapida ad alta temperatura. Ecco una mappa chiara ed essenziale di come funziona la ricetta del processo FJH, e quali sono le variabili fisiche in gioco e perché questo metodo è così efficiente.

Il Principio Fondamentale

Il principio di base è l'**effetto Joule**: far passare un'elevata scarica di corrente elettrica direttamente attraverso il biochar. La resistenza elettrica del materiale convertirà questa scarica in un impulso di calore eccezionale.

- **Temperatura target:** ~ 3000 K (circa 2700--3000°C).
- **Tempo di impulso:** da pochi millisecondi a qualche centinaio di millisecondi (tipicamente 10--100 ms).

Cosa succede alla materia a 3000 K?

A questa temperatura estrema avvengono due eventi simultanei:

1. **Riorganizzazione reticolare:** Tutti i legami di carbonio amorfo, sp^2 disordinato e sp^3 si spezzano. Gli atomi di carbonio si sublimano e ricondensano istantaneamente nella forma termodinamicamente più stabile a quella temperatura: il reticolo esagonale del grafene.

2. **Purificazione flash:** Tutti gli atomi diversi dal carbonio (ossigeno, idrogeno, azoto, zolfo e persino le ceneri/tracce metalliche presenti nel biochar) evaporano all'istante sottotorma di gas volatile, lasciando un carbonio con una purezza quasi assoluta (> 98--99%).

La Procedura Sperimentale in Breve

1. **Preparazione del campione:**
   Il biochar viene finemente macinato. Se il biochar di partenza ha un'elevata resistenza elettrica (perché poco carbonizzato), si aggiunge una minima quantità di carbonio conduttivo (es. *carbon black*) per creare la via d'innesco per la corrente.
2. **Caricamento e Compressione:**
   Il materiale viene inserito in un tubo capillare di quarzo o materiale ceramico isolante e compresso leggermente tra due elettrodi (tipicamente in grafite o ottone). La pressione di compressione regola la resistenza iniziale della matrice.
3. **La Scarica (Il "Flash"):**
   Un pacco di condensatori ad alta capacità viene scaricato sul campione (con tensioni tipicamente comprese tra 100 V e 400 V, fornendo densità di energia di circa 1--8 kJ/g).
4. **Raffreddamento ultra-rapido:**
   Una volta terminato l'impulso, il campione si raffredda quasi istantaneamente.

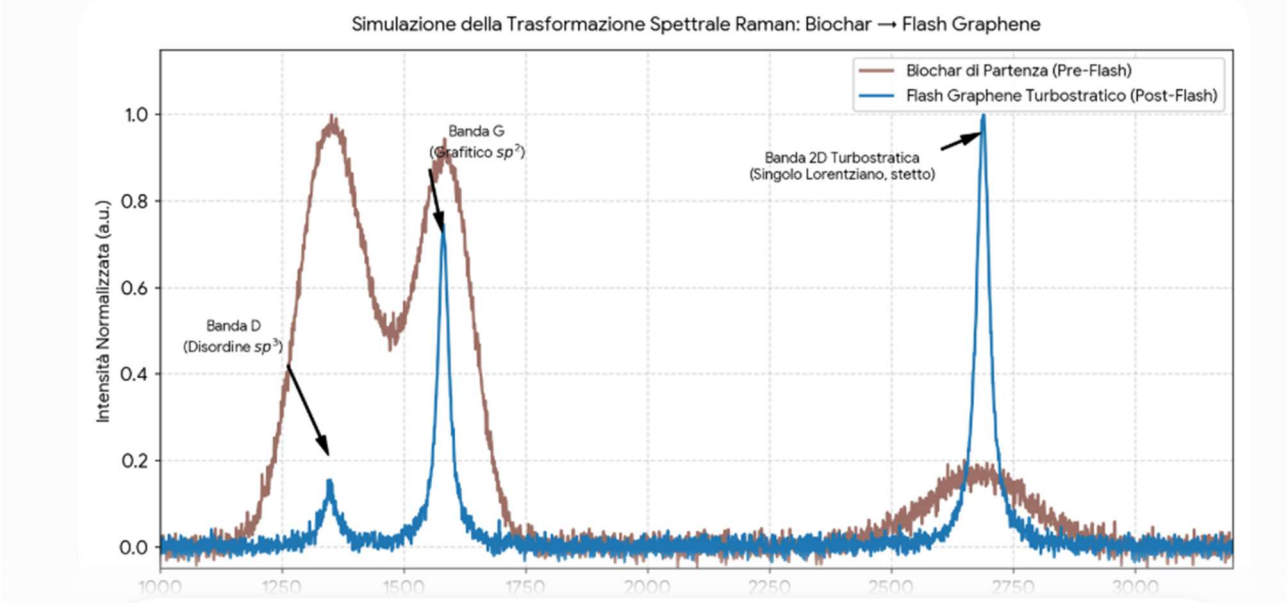
Il Segreto Topologico: Grafene Turbostratico
Un aspetto cruciale di questo metodo è la **struttura** del grafene ottenuto.
Non si ottiene la grafite classica (AB stacking, o impilamento Bernal) dove i fogli sono fortemente legati e coordinati tra loro. Il raffreddamento ultra-rapido "congela" i fogli di grafene in uno **stato turbostratico**:

- I singoli fogli di grafene sono sovrapposti ma **ruotati casualmente** l'uno rispetto all'altro.
- **Vantaggio enorme:** Le interazioni π-π tra i piani sono estremamente deboli. Di conseguenza, il *Flash Graphene* (FG) turbostratico si disperde con estrema facilità nei solventi o nelle matrici polimeriche/cementizie senza richiedere esfoliazioni chimiche aggressive (come il metodo Hummers, che introduce molti difetti).

Perché proprio dal Biochar?
Sostenibilità e "Upcycling":
Il biochar è ricco di carbonio fisso, economico e derivato da biomasse di scarto. Utilizzare il biochar anziché il coke di petrolio o i polimeri sintetici rende il processo a **impronta di carbonio ridotta** (o persino negativa, se la biomassa è a filiera corta). Tuttavia, il biochar richiede un piccolo accorgimento in più rispetto alla grafite sintetica: la presenza di **ceneri** (silice, fosforo, metalli alcalini). Se la temperatura del flash raggiunge e supera i 3000 K, questi elementi sublimano e fuggono sotto forma di vapore; tuttavia, per biochar ad alto contenuto di ceneri, un lavaggio acido preliminare o post-flash garantisce la massima resa in purezza.

Un'occhiata alla firma spettrale (Raman)
Se si andasse ad analizzare questo grafene con uno spettrometro Raman, si noterebbe che:

- Un picco **2D** estremamente affilato e simmetrico (caratteristico dei fogli disaccoppiati/turbostratici).
- Un rapporto I_{2D}/I_G elevato.
- Un picco **D** (legato al disordine) molto basso se l'energia dell'impulso è stata ottimizzata correttamente, a testimonianza di una struttura cristallina eccellente.



La figura mostra l'Impronta Raman di:

- **Biochar:** Caratterizzato da bande **D** e **G** molto larghe e sovrapposte (dovute ad amorfismo e legami sp^3/difetti) e un segnale **2D** pressoché assente o piatto.
- **Flash Graphene Turbostratico:** Presenta l'emergere di un picco **2D** strettissimo e simmetrico (singolo Lorentziano con $I_{2D}/I_G > 1$), una banda **G** molto affilata e la quasi totale assenza della banda **D** (indicatore della rimozione dei difetti e dell'elevata cristallinità sp^2).

Per un confronto tra grafite e grafene turbostratico si veda: Kumar et al. (2024). Per il confronto tra biochar e grafene multistrato, Talebi et al. (2021).

Che applicazioni ha il grafene così ottenuto?

Il grafene ottenuto da biochar tramite *Flash Joule Heating* (spesso chiamato **Flash Graphene** o **FG**) ha caratteristiche fisiche uniche che lo rendono straordinariamente versatile. Essendo un grafene prevalentemente **turbostratico** (con i singoli piani sfalsati e debolmente legati tra loro da forze di van der Waals), presenta un vantaggio industriale enorme: **si disperde con un'estrema facilità** in diversi solventi e matrici, senza richiedere funzionalizzazioni chimiche severe o esfoliazioni ad ultrasuoni prolungate.
Ecco le principali applicazioni avanzate suddivise per settore:

1. Materiali Edili e Ingegneria Civile (Cemento e Calcestruzzo)
È una delle applicazioni più promettenti su grande scala, grazie al costo contenuto del biochar di partenza.

- **Rafforzamento meccanico:** L'aggiunta di una percentuale bassissima di Flash Graphene (anche solo lo 0.02--0.05% in peso) al cemento ne aumenta la resistenza alla compressione (+30--40%) e alla flessione.
- **Impronta ecologica ridotta:** Aumentando la resistenza del materiale, si riduce la quantità di cemento necessaria per le strutture. Inoltre, intrappolare il carbonio del biochar nel calcestruzzo crea un processo di sequestro della CO_2 a lungo termine.
- **Impermeabilità:** Riduce la porosità della matrice cementizia, aumentando la resistenza alla penetrazione di acqua e agenti corrosivi (cloruri, solfati).

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894724084171 ci dice il “Flash graphene (FG) was rapidly produced by flash Joule heating from carbon black. FG with turbine structure enables strong interfacial bonding with cement matrix. FG can modify C-S-H gel nanostructure of cementitious composites. FG improves the compressive/flexural strength of cement pastes by 16.8%/37.2%. It’s a new avenue to reinforce cementitious composites with low cost/CO2 emission.”

2. Nanocompositi e Polimeri

I polimeri potenziati con grafene turbostratico mostrano prestazioni eccellenti grazie all'ottima dispersione della fase di carica.

- **Matrici Polimeriche e Plastiche:** Aggiunto a resine epossidiche, HDPE o poliuretani, migliora drasticamente la rigidità, la tenacità al fratturamento e la resistenza alla fatica.
- **Schermatura Elettromagnetica (EMI Shielding):** Rende i materiali plastici leggermente conduttivi, ideali per rivestimenti in grado di schermare interferenze elettromagnetiche nei dispositivi elettronici e nell'automotive.
- **Conducibilità Termica:** Favorisce la dissipazione del calore in componenti elettronici flessibili o in elementi strutturali soggetti a stress termico.

3. Accumulo di Energia e Elettrochimica

Anche se il processo è rapidissimo, il grafene ottenuto possiede un'elevata conducibilità elettrica e un'ottima area superficiale.

- **Supercondensatori:** La struttura turbostratica impedisce il "ri-impilamento" (*restacking*) dei fogli di grafene, mantenendo accessibile l'area superficiale agli elettroliti e garantendo un'elevata densità di potenza e capacità specifica.
- **Batterie agli Ioni di Litio/Sodio:** Utilizzato come additivo conduttivo negli anodi o nei catodi per migliorare il trasporto elettronico e la stabilità dei cicli di carica/scarica.

4. Bonifica Ambientale e Trattamento Acque

- **Adsorbimento e Filtrazione:** La combinazione dell'elevata area superficiale e dell'eventuale porosità residua rende questo materiale ideale per la cattura di metalli pesanti, idrocarburi o inquinanti organici nelle acque reflue.
- **Desalinitazione e Membrane:** Utilizzato per la fabbricazione di membrane composite ad alta permeabilità e selettività molecolare.

5. Inchiostri Conduttivi ed Elettronica Stampata

- **Inchiostri a base di carbonio:** Grazie alla facilità di dispersione in solventi ecologici (senza bisogno di tensioattivi aggressivi), il Flash Graphene può essere formulato in inchiostri per stampare circuiti flessibili, sensori piezoresistivi, antenne RFID e dispositivi indossabili (*wearable electronics*).

Sintesi delle Caratteristiche Chiave

Proprietà del Flash Graphene	**Vantaggio Applicativo**
Struttura Turbostratica	Nessun *restacking*, facilità di dispersione istantanea in matrici.
Basso Costo della Materia Prima	Il biochar (da scarto agricolo/biomassa) abbassa drasticamente il costo $/kg$.

Proprietà del Flash Graphene	Vantaggio Applicativo
Elevata Purezza (> 98%)	Ottima conducibilità elettrica e stabilità termica senza trattamenti acidi.
Sostenibilità (Carbon Negative)	Fissa il carbonio organico in una forma inerte e ad altissimo valore aggiunto.

Le industrie che lo usano

Il passaggio dal laboratorio all'industria è già avvenuto ed è in forte espansione, trainato proprio dalla scalabilità e dall'economicità del metodo. Il caso industriale principale è **Universal Matter Inc.**, https://www.universalmatter.com/ , lo spin-off nato direttamente dalla *Rice University* (fondato insieme a James Tour), che ha industrializzato e brevettato la tecnologia *Flash Joule Heating* (FJH) su scala commerciale.
Ecco come le aziende stanno integrando e commercializzando questo grafene:

1. I Settori e le Aziende Gia Attive

- **Calcestruzzo e Cemento Verde:**
  Aziende del settore edile e dei materiali avanzati stanno collaborando con i produttori di *Flash Graphene* per integrare additivi specifici nei miscelatori di cemento.
  - **Prodotti specifici:** Formulazioni già pronte all'uso (come la linea *Genable™ Decarbonizer* di Universal Matter) che vengono disperse direttamente nell'acqua d'impasto del calcestruzzo per ridurne il quantitativo necessario e aumentarne la resistenza del 30--40%.
- **Asfalto e Pavimentazioni Stradali:**
  L'asfalto additivato con *Flash Graphene* da biochar e gomme riciclate (*Genable™ Pavement*) aumenta la stabilità termica e la resistenza all'usura da carico pesante. Diversi tratti stradali sperimentali e commerciali negli Stati Uniti e in Canada stanno testando e integrando queste miscele per prolungare la vita dell'asfalto del +30%.
- **Pneumatici e Gomma (Circular Economy):**
  Aziende del settore *tire & rubber* utilizzano la pirolisi di pneumatici usati (che produce un biochar/carbon black di scarto) per applicare il FJH e reinserire il grafene ottenuto nella mescola delle nuove gomme, migliorando la resistenza all'abrasione e riducendo la resistenza al rotolamento.
- **Vernici, Rivestimenti e Compositi:**
  Attraverso l'acquisizione di *Applied Graphene Materials* (AGM), Universal Matter ha integrato formulazioni di *Flash Graphene* in resine epossidiche e vernici protettive per prevenire la corrosione nei settori navale e aerospaziale.

2. Perché le Industrie Preferiscono il *Flash Graphene*?

Le industrie stanno adottando questa variante specifica per tre ragioni di mercato fondamentali:

1. **Il Bottleneck del Costo:** Il grafene tradizionale (CVD o via esfoliazione chimica) costa da decine a centinaia di dollari al grammo. Il FJH da biochar abbatte i costi di produzione a pochi dollari al chilo su scala tonnellata.
2. **Facilità di Miscelazione:** Essendo turbostratico, le aziende non devono modificare i loro processi produttivi o usare solventi tossici: il grafene si disperde facilmente nelle formulazioni liquide o nei polimeri fusi.

3. **Punteggio di Sostenibilità (Carbon Credits):** Per i grandi produttori di cemento o plastica, dichiarare di utilizzare un additivo ricavato dal biochar (carbonio sequestrato da scarti agricoli) permette di accedere a certificazioni ambientali (come gli *EPD - Environmental Product Declarations*) e ridurre le tasse sui crediti di carbonio.

In sintesi, si è passati dalla dimostrazione scientifica a una vera e propria filiera di **upcycling industriale**.

Esistono metodi alternativi per ottenere questo tipo di grafene?

La risposta breve è **no, non direttamente con le stesse caratteristiche**.
Il motivo principale risiede nelle condizioni termodinamiche e cinetiche uniche del *Flash Joule Heating* (FJH). La sintesi di questo specifico grafene—particolarmente puro e **turbostratico**—richiede due condizioni estreme contemporanee: **temperature elevatissime (**$\sim$ 3000 K**)** e tempi di riscaldamento/raffreddamento **ultra-rapidi (millisecondi)**.
I metodi di sintesi tradizionali o alternativi seguono vie diverse e portano a materiali distinti:

1. Pirolisi Convenzionale (Slow o Fast Pyrolysis)
La pirolisi è il processo termochimico usato proprio per fare il **biochar**, operando tipicamente tra i 400°C e gli 800°C in assenza di ossigeno.

- **Cosa si ottiene:** Biochar, ovvero una matrice di carbonio amorfo, ricca di difetti, con un reticolo parzialmente grafitizzato ma disordinato e con molte impurezze/ceneri residuamente intrappolate.
- **Perché non dà grafene:** Manca la temperatura sufficiente (3000 K) per spezzare tutti i legami sp^3 e permettere la sublimazione e ricondensazione istantanea in un reticolo esagonale ordinato.

2. Pirolisi ad Altissima Temperatura / Grafitizzazione Termica ($>$ **2500°C)**
Se si prende il biochar e lo si riscalda in un forno ad alte temperature per ore:

- **Cosa si ottiene: Grafite sintetica (o Bernal Graphite)**.
- **Perché è diversa dal Flash Graphene:** Il riscaldamento e il raffreddamento sostenuti nel tempo consentono agli strati di carbonio di organizzarsi nella loro configurazione termodinamicamente più stabile a lungo termine, ovvero l'impilamento ordinato AB (*Bernal stacking*). I fogli si legano fortemente tra loro e diventano difficili da separare o disperdere, richiedendo poi trattamenti chimici aggressivi (come l'ossidazione) per ottenere foglietti di grafene.

3. Deposizione Chimica da Vapore (CVD - Chemical Vapor Deposition)

- **Come funziona:** Si usano gas idrocarburi (es. metano) fatti scorrere su un catalizzatore metallico (rame o nichel) ad alte temperature ($\sim$ 1000°C).
- **Cosa si ottiene:** Grafene monocristallino di qualità altissima (privo di difetti, perfetto per l'elettronica).
- **Differenza con il FJH:** La CVD richiede un substrato metallico, costi altissimi, gas puri e produce grafene su scala sottile (film), non "in massa" (grammi/chilogrammi come con il biochar e il FJH).

4. Altri Metodi Impulsivi o ad Alta Energia (I più vicini al FJH)
Esistono altre tecniche ad alta energia che riescono a produrre grafene simile a quello da *flash*:

- **Sintesi via Plasma (Thermal Plasma / Microwave Plasma):**
  Far passare biomasse o idrocarburi attraverso un plasma ad alta temperatura. La transizione rapida permette la sintesi di grafene in fase gassosa, ma richiede apparecchiature complesse e ha consumi energetici per grammo spesso superiori.

- **Ablazione Laser (Laser-Induced Graphene - LIG):**
  L'uso di impulsi laser (spesso su film polimerici o strati di biochar) per convertire localmente il carbonio in grafene. Condivide la fisica del riscaldamento impulsivo ad alta temperatura, ma è un processo prevalentemente bidimensionale (di superficie) e meno adatto alla produzione massiva in volume.

In Sintesi

Metodo	Temperatura	Tempo di Processo	Risultato Finale
Pirolisi standard	400--800°C	Ore	**Biochar** (Carbonio amorfo/disordinato)
Grafitizzazione termica	> 2500°C	Ore	**Grafite** (Impilamento Bernal AB, difficile da disperdere)
CVD	~ 1000°C	Minuti/Ore	**Monostrato di Grafene** (Per microelettronica, costosissimo)
Flash Joule Heating (FJH)	~ 3000 K	**Milliseconds** (10--100 ms)	**Flash Graphene Turbostratico** (Alta purezza, facile dispersione)

Il "trucco" del FJH è proprio il **raffreddamento ultra-rapido** dopo l'impulso a 3000 K: congelando la materia prima che i fogli possano impilarsi ordinatamente in grafite, preserva la struttura turbostrata unica e disperdibile.

Pirolisi assistita a microonde

La **pirolisi catalitica assistita da microonde** (*Microwave-Assisted Catalytic Pyrolysis*, MACP) è una tecnica avanzata per la conversione termochimica della biomassa o di precursori di carbonio (come il biochar) in materiali strutturati, bio-oli e gas. Rispetto alla pirolisi convenzionale basata sulla conduzione termica da pareti esterne, la MACP sfrutta l'interazione diretta tra il campo elettromagnetico e la materia per generare calore "dall'interno".

1. Il Meccanismo Fisico: Riscaldamento Volumetrico e Hotspot
Biomasse e biochar grezzo hanno spesso scarsa assorbibilità per le microonde (basso fattore di perdita dielettrica, $\tan\delta$). Per attivare la pirolisi si aggiungono **ricettori/assorbitori di microonde** e **catalizzatori**.

- **Polarizzazione dipolare e conduzione ionica:** Le microonde (frequenza tipica 2.45 GHz) oscillano i dipoli e muovono le cariche libere nella matrice.
- **Riscaldamento volumetrico rapido:** Il materiale assorbe l'energia elettromagnetica convertendola in calore direttamente nel volume del campione, raggiungendo rami di riscaldamento (*heating rate*) molto elevati.
- **Micro-archi e Hotspot locali:** Quando nel materiale sono presenti particelle metalliche o domini grafitici, il campo elettrico induce micro-scariche di plasma locali. In questi punti la temperatura può schizzare istantaneamente sopra i $1500\ °C - 2000\ °C$ per brevi frazioni di secondo, pur mantenendo la temperatura media del reattore più bassa.

2. Ruolo dei Catalizzatori nella Trasformazione del Carbonio
I catalizzatori usati nella MACP svolgono un doppio ruolo: **assorbitori di microonde** e **promotori di ristrutturazione strutturale**.

- **Catalizzatori a base di metalli di transizione (**Fe,Ni,Co**):** Sotto l'azione delle microonde, i precursori metallici formano nanoparticelle prive di ossido. Queste nanoparticelle agiscono come "nuclei di dissoluzione e ricristallizzazione": dissolvono il carbonio amorfo circostante affetto da *hotspot* e lo ri-precipitano sotto forma di domini aromatici altamente ordinati o nanotubi/foglietti di grafene.
- **Assorbitori a base di Carbonio (Biochar attivato, Grafite, MWCNT):** Vengono miscelati come suscettori per avviare l'assorbimento primario, scatenando il cosiddetto *thermal runaway* controllato.
- **Catalizzatori Basici/Acidi (**MgO,Zeoliti**):** Usati se l'obiettivo è la modifica dei gruppi funzionali superficiali o il *cracking* selettivo delle componenti volatili (bio-olio/gas).

3. Perché è rilevante per la sintesi del Grafene Turbostratico?
Per spingere la matrice verso la fase **turbostrata** (piani di grafene paralleli ma disordinati angolarmente lungo l'asse c), la MACP combina la cinetica di ricristallizzazione veloce con la disomogeneità termica locale:

- Il superamento rapido e locale delle barriere energetiche fonde e ricompone i legami sp^2.
- I tempi brevi della pirolisi a microonde impediscono alle lamelle di trovare l'allineamento termodinamicamente stabile di tipo Bernal (AB), intrappolandole nella configurazione rotata/turbostrata.

4. Vantaggi e Sfide Tecniche

Vantaggi	Sfide e Limiti
Efficienza energetica: Il riscaldamento è diretto sul campione, senza scaldare le pareti del forno.	**Controllo della temperatura:** Gli *hotspot* possono generare gradienti di temperatura non uniformi e difficili da misurare precisamente con pirometri o termocoppie.
Cinetica di reazione rapida: Riduzione drastica dei tempi di processo rispetto al riscaldamento radiativo.	**Penetrazione del campo:** All'aumentare della grafitizzazione del campione, la riflettanza alle microonde aumenta, riducendo la profondità di penetrazione dell'onda.
Preshock termico: Facilità nel raggiungere elevate temperature locali indispensabili per esfoliazione e de-ossigenazione.	**Degradazione catalitica:** Possibile disattivazione o incrostazione (*coking*) delle nanoparticelle metalliche.

Evoluzione Microstrutturale e Natura dell'Impilamento Turbostratico
Nell'ambito dei processi di trasformazione termica delle biomasse carboniose, la comprensione dell'organizzazione spaziale dei piani atomici costituisce un elemento chiave per determinare le proprietà finali del materiale. È fondamentale distinguere tra il concetto di *formazione di multi-layer* e la natura dell'**impilamento turbostratico** (*turbostratic stacking*).

1. La Transizione da Carbonio Amorfo a Foglietti Paralleli

Durante il trattamento termico del biochar ad alte temperature, la matrice di carbonio subisce una profonda riorganizzazione. A temperature intermedie, l'energia fornita al sistema spezza i legami disordinati di tipo sp^3 e promuove la crescita di piccoli cluster aromatici sp^2. L'allineamento guidato dalle interazioni tra orbitali π--π favorisce la progressiva sovrapposizione spaziale di questi domini, portando alla formazione di pacchetti di foglietti orientati parallelamente (*layer stacking*).
Questo fenomeno descrive semplicemente il passaggio da una struttura amorfa tridimensionale a una morfologia lamellare stratificata (multi-layer).

2. Impilamento Bernal (AB) vs. Impilamento Turbostratico
Tuttavia, la presenza di più strati sovrapposti non implica necessariamente la formazione di grafite convenzionale:

- **Impilamento Bernal (*AB* Stacking):** Tipico della grafite termodinamicamente stabile, in cui i foglietti adiacenti sono perfettamente coordinati e bloccati in una griglia spaziale rigida. Le forti interazioni interstrato rendono il materiale estremamente coeso e difficile da esfoliare o disperdere.
- **Impilamento Turbostratico:** In questa configurazione, pur trovandosi il materiale in una forma multi-layer (più piani sovrapposti), i singoli foglietti di grafene mantengono un angolo di rotazione casuale (*twist*) lungo l'asse normale ai piani.

3. Il Ruolo Cinematico del Raffreddamento Rapido
La rotazione casuale dei piani impedisce la perfetta sovrapposizione degli orbitali π, riducendo drasticamente le forze di van der Waals tra gli strati. Il disaccoppiamento elettronico che ne deriva preserva le proprietà elettroniche e meccaniche tipiche del singolo strato di grafene.
In processi a cinetica ultra-rapida ad altissima temperatura—come il *Flash Joule Heating*—il raggiungimento istantaneo di temperature elevate (~ 3000 K) promuove la rapida grafitizzazione, mentre il successivo raffreddamento quasi istantaneo (*quench*) "congela" i foglietti nello stato turbostratico. Si impedisce così al sistema di evolvere verso la configurazione di equilibrio AB, garantendo al materiale finale una straordinaria attitudine alla dispersione spontanea in matrici liquide o polimeriche.

Quindi:

1. L'esistenza di più strati (*multi-layer*) non è in contrasto con il grafene turbostratico.
2. Si giustifica teoricamente perché il materiale risulta così facile da miscelare nelle applicazioni applicative (come i cementi o i polimeri).

Caso di studio: la lolla di riso (rice husk biochar.

La lolla di riso è rinomata per avere un contenuto eccezionalmente alto di ceneri inorganiche, composte per oltre l'**80–90% da silice (SiO_2) amorphous**. Se non gestita, la silice finisce per contaminare il prodotto finale o alterare la conducibilità durante l'impulso elettrico. Per rimuovere o gestire la silice durante la produzione di *Flash Graphene*, ci sono due strategie principali: una **in-situ (durante il flash)** e una **pre/post-trattamento (chimica)**.

1. Rimozione In-Situ tramite Sublimazione Flash (High-Temperature Sublimation)
Il bello del metodo *Flash Joule Heating* è che lavora a temperature ben superiori ai punti di fusione ed evaporazione di molti minerali.

- **Punto di fusione della silice (SiO_2):** ~ 1710°C (1983 K).
- **Punto di ebollizione/sublimazione della silice:** ~ 2230°C (2503 K).

Quando l'impulso FJH porta la temperatura a ~ 3000 K, la silice e la maggior parte delle ceneri inorganiche **evaporano istantaneamente** sottotorma di gas e vapori volatili. I vapori di silice abbandonano la matrice di carbonio prima che questa si ricondensi nel reticolo del grafene.

Il problema dell'in-situ per la lolla di riso:
Poiché la percentuale di silice nella lolla di riso è molto elevata (può superare il 15-20% del peso totale del biochar), l'evaporazione massiva di SiO_2 durante il flash può creare un'eccessiva sovrappressione di gas nel capillare di reazione o richiedere un'energia di impulso molto più alta per sublimare tutta la frazione minerale.

2. Pre-Trattamento Chimico (Lisciviazione / Leaching) — *La via raccomandata*
Per biomasse ad altissimo contenuto di silice come la lolla di riso, la strategia più efficiente ed usata in letteratura consiste nel rimuovere la silice **prima** di effettuare il *flash*.
Esistono due vie per lisciviare la silice dal biochar:

A. Estrazione Alcalina (Metodo Base - NaOH)
È il metodo più sicuro ed ecologico da gestire in laboratorio. La silice reagisce con le basi forti formando silicato di sodio solubile in acqua:

$$SiO_2 + 2NaOH \longrightarrow Na_2SiO_3 \text{ (solubile)} + H_2O$$

1. Si sospende il biochar di lolla di riso in una soluzione di **Idrossido di Sodio (**NaOH**)** 1--2 M a 80--90°C per 1--2 ore.
2. Si filtra la sospensione. La silice passa nel filtrato come silicato di sodio (che tra l'altro è un sottoprodotto utile industriale).
3. Si lava il biochar rimasto con acqua distillata e si asciuga. Si ottiene un biochar de-silificato, ad alto tenore di carbonio puro, pronto per il *flashing*.

B. Estrazione Acida (HF o NH_4HF_2)
L'Acido Fluoridrico (HF) scioglie direttamente la silice formando acido fluorosilicico:

$$SiO_2 + 6HF \longrightarrow H_2SiF_6 + 2H_2O$$

- *Nota:* È estremamente efficace anche a temperatura ambiente, ma l'HF è altamente tossico e pericoloso da maneggiare. In alternativa si usa talvolta il bifluoruro di ammonio (NH_4HF_2), ma per motivi operativi l'estrazione alcalina con NaOH rimane preferibile.

3. Effetto della De-silificazione sul Processo Flash
Rimuovere la silice prima del *flash* porta tre vantaggi immediati:
1. **Maggiore Conducibilità Elettrica:** La silice è un isolante elettrico. Eliminando la silice dal biochar, la resistenza iniziale del campione diminuisce, rendendo più facile l'innesco del *Flash Joule Heating* senza dover aggiungere troppo *carbon black* conduttivo.
2. **Minore Consumo Energetico:** Non si spende energia del pacco condensatori per sublimare la silice a 3000 K.
3. **Purezza del Grafene (> 99%):** Il grafene turbostratico ottenuto presenta una firma Raman pulita, priva di interferenze da silicati o carburo di silicio (SiC) residuo.

Conclusioni

La tecnologia di Flash Joule Heating (FJH) applicata al biochar dimostra come sia possibile coniugare la valorizzazione di scarti agricoli o industriali (upcycling) con la produzione su larga scala di grafene ad altissima qualità. Il superamento dei vincoli termodinamici convenzionali tramite l'uso di impulsi ad altissima temperatura (~3000 K) consente di ottenere una duplice azione istantanea: la purificazione del materiale e la sua trasformazione in grafene turbostratico.

Questa specifica configurazione topologica, priva del rigido impilamento Bernal tipico della grafite, conferisce al materiale un'eccezionale facilità di dispersione in matrici polimeriche ed edilizie, eliminando i costi e i difetti associati ai tradizionali metodi di esfoliazione chimica. Come dimostrano

le recenti applicazioni industriali e la letteratura scientifica, l'impiego del Flash Graphene in settori chiave come il cemento verde, l'asfalto e i dispositivi elettrochimici offre una via concreta per abbattere i costi di produzione e promuovere la decarbonizzazione dei materiali. In conclusione, la tecnica del flashing biochar si conferma un modello virtuoso di sintesi sostenibile, capace di trasformare un precursore economico in un pilastro per i nanocompositi del futuro.

References

Advincula, P. A., Meng, W., Eddy, L. J., Scotland, P. Z., Beckham, J. L., Nagarajaiah, S., & Tour, J. M. (2023). Replacement of concrete aggregates with coal-derived flash graphene. ACS Applied Materials & Interfaces, 16(1), 1474-1481.

Advincula, P. A., Beckham, J. L., Choi, C. H., Chen, W., Han, Y., Kosynkin, D. V., ... & Tour, J. M. (2023). Tunable hybridized morphologies obtained through flash joule heating of carbon nanotubes. ACS nano, 17(3), 2506-2516.

Bakar, R. A., Yahya, R., & Gan, S. N. (2016). Production of high purity amorphous silica from rice husk. Procedia chemistry, 19, 189-195.

Choi, C. H. W., Shin, J., Eddy, L., Granja, V., Wyss, K. M., Damasceno, B., ... & Tour, J. M. (2024). Flash-within-flash synthesis of gram-scale solid-state materials. Nature chemistry, 16(11), 1831-1837.

Jia, C., Pang, M., Lu, Y., Liu, Y., Zhuang, M., Liu, B., ... & Yang, Y. (2022). Graphene environmental footprint greatly reduced when derived from biomass waste via flash Joule heating. One Earth, 5(12), 1394-1403.

Kalapathy, U., Proctor, A., & Shultz, J. (2000). A simple method for production of pure silica from rice hull ash. Bioresource technology, 73(3), 257-262.

Kumar, K. V., Islam, A., Kiran, P. S., Pandit, N., Kumar, R., Indupuri, S., & Keshri, A. K. (2024). Exfoliation of graphite to turbostratic graphene. 2D Materials, 11(1), 015022.

Li, J., Dai, J., Liu, G., Zhang, H., Gao, Z., Fu, J., ... & Huang, Y. (2016). Biochar from microwave pyrolysis of biomass: A review. Biomass and Bioenergy, 94, 228-244.

Luong, D. X., Bets, K. V., Algozeeb, W. A., Stanford, M. G., Kittrell, C., Chen, W., ... & Tour, J. M. (2020). Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. Nature, 577(7792), 647-651.

Mahmood, F., Mbeugang, C. F. M., Asghar, F., Xie, X., Lin, D., Liu, D., & Li, B. (2025). Understanding the synthesis of turbostratic/flash graphene via Joule heating. Materials, 18(12), 2892.

Nayak, P. P., Nandi, S., & Datta, A. K. (2019). Comparative assessment of chemical treatments on extraction potential of commercial grade silica from rice husk. Engineering Reports, 1(2), e12035.

Obiora, N. K., Ujah, C. O., Ekwueme, B. N., Asadu, C. O., & Olubambi, P. A. (2026). Production of sustainable graphene and its derivatives through flash joule heating: A systemic review. Materials Science for Energy Technologies.

Pacheco Flores de Valgaz, A., Salcedo Cajas, G., & Rivas Fermín, A. (2024, July). From Rice Husk to Graphene: Exploring the Effect of Calcination and Leaching. In International Conference on Science, Technology and Innovation for Society (pp. 271-281). Cham: Springer Nature Switzerland.

Prokopiev, A. R., Loskin, N. N., & Vinokurov, P. V. (2025). Synthesis of Turbostratic Graphene with Micron-Sized Domains from Activated Charcoal by Fast Joule Heating. Nanomaterials, 15(24), 1885.

Saleh, H. M., & Hassan, A. I. (2022). Graphene from rice husk. Graphene from Natural Sources: Synthesis, Characterization, and Applications, 73.

Sparavigna, A.C. (2023). Tsallis q-Gaussian function as fitting lineshape for Graphite Raman bands. ChemRxiv. 17 July 2023. DOI: https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-bwnmw

Su, X., Ge, L., Huang, S., Wang, X., Xie, H., Liu, Y., Yi, L., Liu, L., Meng, J., & Meng, H. (2026). Sustainable graphene from biomass via flash Joule heating: An innovative approach for cement mechanical performance. Biomass and Bioenergy, 208, p.108876.

Talebi, S. S., Javid, A. B., Roudbari, A. A., Yousefi, N., Ghadiri, S. K., Shams, M., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Defluoridationof drinking water by metal impregnated multi-layer green graphene fabricated from trees pruning waste. Environmental science and pollution research, 28(14), 18201-18215.

Tamuly, J., Bhattacharjya, D., & Saikia, B. K. (2022). Graphene/graphene derivatives from coal, biomass, and wastes: synthesis, energy applications, and perspectives. Energy & Fuels, 36(21), 12847-12874.

Ugheoke, I. B., & Mamat, O. (2012). A critical assessment and new research directions of rice husk silica processing methods and properties. Maejo international journal of science and technology, 6(3), 430.

Umeda, J., & Kondoh, K. (2008). High-purity amorphous silica originated in rice husks via carboxylic acid leaching process. Journal of materials science, 43(22), 7084-7090.

Wang, D., Ding, S., Wang, X., Qiu, L., Qin, H., Ni, Y. Q., & Han, B. (2024). Low-cost flash graphene from carbon black to reinforce cementitious composites for carbon footprint reduction. Chemical Engineering Journal, 500, 156926.

Wang, C., Wang, B., Su, X., & He, R. (2024). Synthesis of graphene from waste rubber powder based on flash joule heating method and its influence on the performance of cement mortar. Construction and Building Materials, 451, 138871.

Xian, S., Liu, J., & Xu, Q. (2026). Microwave-Assisted Biomass Pyrolysis to Hydrocarbons: A Review of Catalyst Evolution from Single-Function to Multi-Site Composites. Catalysts (2073-4344), 16(5), 450.

Yalcin, N., & Sevinc, V. (2001). Studies on silica obtained from rice husk. Ceramics international, 27(2), 219-224.

Zamani, A., Marjani, A. P., & Mousavi, Z. (2019). Agricultural waste biomass-assisted nanostructures: Synthesis and application. Green Processing and Synthesis, 8(1), 421-429.

Zhang, Y., Fan, S., Liu, T., Fu, W., & Li, B. (2022). A review of biochar prepared by microwave-assisted pyrolysis of organic wastes. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 50, 101873.