



MATERIALI AVANZATI PER SEMICONDUTTORI: NITRURO DI GALLIO

Il nitruro di gallio (GaN) è un materiale semiconduttore della famiglia dei ‘materiali a banda larga di conduzione’ (WBG, Wide Band Gap) con mobilità elettronica elevata e alta densità di corrente. Queste proprietà consentono lo sviluppo di dispositivi ad alta efficienza e ad alta potenza per applicazioni che spaziano dall’elettronica di consumo ai sistemi di alimentazione automobilistici e industriali. Questo articolo fornisce una panoramica delle caratteristiche del materiale GaN, delle strutture dei dispositivi e delle tendenze di mercato, con particolare attenzione ai vantaggi rispetto ai materiali tradizionali come il silicio (Si), il carburo di silicio (SiC) e l’arseniuro di gallio (GaAs).

Proprietà del nitruro di gallio (GaN)

Uno degli obiettivi industriali, economici e tecnologici principali è migliorare la vita dell’umanità in un mondo sempre più complesso. Questa complessità può essere gestita attraverso strumenti adeguati e accessibili. Il telefono cellulare ne è un buon esempio: oggi piccole batterie sono sufficienti per ricaricare computer e telefoni, dispositivi sempre più piccoli, sottili e leggeri. Ciò è stato possibile grazie ai nuovi dispositivi basati su materiali a banda larga di conduzione (WBG), che consentono la miniaturizzazione e il funzionamento ad alte frequenze, come nel caso del nitruro di gallio (GaN). Il nitruro di gallio presenta proprietà eccellenti per la scienza dei materiali: elevata mobilità elettronica e alta densità di corrente, che permettono di operare ad alte tensioni e di realizzare microchip ad alta efficienza e alta frequenza. Rispetto al silicio o all’arseniuro di gallio (GaAs), tradizionalmente utilizzati per i dispositivi a semiconduttore, il GaN è una molecola più piccola e mostra una maggiore efficienza [1]. Il nitruro di gallio è un materiale a larga banda di conduzione (WBG): in Fig. 1 è rappresentato il salto dell’elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione. L’energia richiesta per il GaN è di 3,4 eV, rispetto a 1,12 eV per il silicio. Questa proprietà consente al GaN di raggiungere

un campo elettrico di $3,3 \text{ MV}\cdot\text{cm}^{-1}$, undici volte superiore a quello del silicio ($0,3 \text{ MV}\cdot\text{cm}^{-1}$). Ciò significa che uno strato di GaN per i chip elettronici può essere undici volte più sottile rispetto agli strati epitassiali di silicio, mantenendo la stessa tensione ma con resistività inferiore [2].

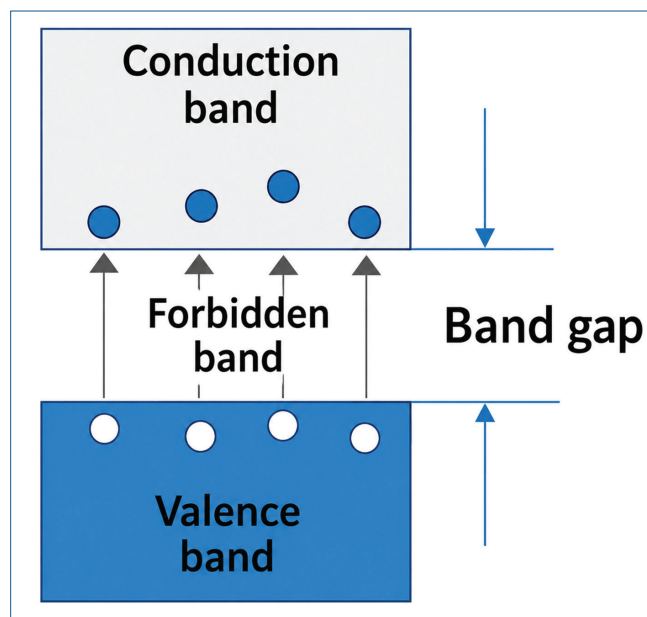


Fig. 1 - Modello del salto dell’elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Nel caso del salto del silicio, il valore è 1,12 eV; nel caso del GaN è 3,4 eV

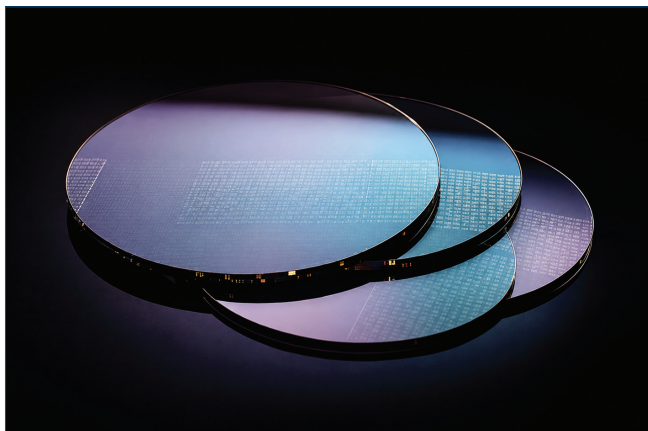


Fig. 2 - Wafers di silicio

Il nitruro di gallio mostra inoltre un'elevata mobilità elettronica, fino a $2000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Può operare a temperature più elevate rispetto al silicio tradizionale: la sua conducibilità termica è di $2,0 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, intermedia tra quella del silicio ($1,5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e quella del carburo di silicio (SiC), pari a $4,9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [2]. Secondo gli analisti di settore, la crescita dei dispositivi di potenza basati su substrati GaN è stimata intorno al 6% entro il 2029, mentre l'intero comparto dei materiali WBG dovrebbe crescere fino al 29% [3]. Le principali applicazioni includono, ad esempio, il controllo delle batterie per auto, PC, telefoni e centraline elettroniche. Il GaN depositato su silicio può inoltre competere nel mercato dei dispositivi per le auto elettriche a 48 V [3].

Substrati di silicio: wafers con orientazione <111>

Per la preparazione dei semiconduttori si utilizzano dischi di silicio (wafers) ad alta purezza (silicio chimico con purezza "11 nove"), impiegati come substrato di base per la maggior parte dei microchip, disponibili in diverse dimensioni e a costi competitivi (Fig. 2). Il GaN viene depositato su questi wafers, che presentano diametri variabili da 150 mm a 300 mm.

I cristalli di silicio sono selezionati in base al loro orientamento cristallografico. A causa della simmetria esagonale del cristallo di GaN, l'orientazione (111) rappresenta la condizione più favorevole per la crescita del GaN rispetto ai substrati con orientazione (100). Questa scelta è necessaria per limitare lo stress generato dal disallineamento reticolare tra nitruro di gallio e silicio.

La temperatura di fusione del silicio è di 1414°C , valore che coincide con quello richiesto per la purificazione del silicio monocristallino [4]. La principale contaminazione del materiale deriva dall'ossigeno che si forma nel reattore durante il raffreddamento del cristallo: il quarzo del contenitore rilascia ossigeno a contatto con il fuso di silicio, favorendo la precipitazione di ossidi e la formazione di complessi [4]. Se l'ossigeno inglobato si concentra nelle zone superficiali del wafer, può compromettere il funzionamento del microchip in preparazione, generando cortocircuiti. Per questo motivo è essenziale definire con precisione la quantità di ossigeno accettabile per ogni dispositivo.

La concentrazione di ossigeno nel substrato viene misurata tramite spettroscopia infrarossa (IR) ed espressa in $\text{atomi} \cdot \text{cm}^{-3}$; per praticità, considerando densità e peso atomico del silicio, il valore può essere convertito in ppma (parti per milione atomiche).

Le specifiche dei wafer di silicio con orientazione (111) fino a 300 mm di diametro sono riassunte in Tab. 1. Le richieste principali riguardano due configurazioni: una con bassa resistività e contenuti di ossigeno compresi tra 5 e 30 ppma, destinata ai dispositivi di potenza; l'altra con resistività molto elevata e livelli di ossigeno inferiori a 10 ppma, utilizzata per dispositivi di radiofrequenza, comunicazioni (5G, 6G) e optoelettronica.

Per quanto riguarda lo spessore, i wafer destinati alle applicazioni GaN devono essere più robusti rispetto a quelli per silicio, così da ridurre il rischio di stress e difetti. Alcuni produttori adottano spessori standardizzati: $625 \mu\text{m}$ per wafer da 150 mm, $725 \mu\text{m}$ per quelli da 200 mm e $775 \mu\text{m}$ per i 300 mm; in alcuni casi si arriva fino a $1500 \mu\text{m}$. I wafer possono deformarsi per stress termico, assumendo

Gruppi di clienti	Drogante	Cristallo	Spessore (micron)	Resistività	Ossigeno (ppma)
A	P (Boro)	<111>	775	1-12 mohm-cm	10-28
B	P (Boro)	<111>	775	1 K-6 K ohm-cm	5-10
C	P (Boro)	<111>	1000	1-5 mohm-cm	<28
D	N (Fosforo)	<111>	1000	1-10 mohm-cm	<25

Tab. 1 - Silicio utilizzato per diverse applicazioni GaN

curvature concave o convesse (imbarcamento), e presentare difetti ai bordi: livelli elevati di deformazione rappresentano un rischio per i dispositivi e sono ampiamente documentati [4, 5].

I droganti impiegati per attivare il comportamento semiconduttore del GaN sono principalmente di tipo P (boro), con una domanda minore di droganti di tipo N (fosforo o arsenico). La concentrazione di drogante determina la resistività del materiale, secondo la legge di Ohm $R = \rho \cdot l \cdot S^{-1}$.

Gli strati epitassiali di GaN possono essere cresciuti tramite deposizione MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition), tecnica applicabile a diversi materiali come silicio, SiC, GaN, diamante o zaffiro, ciascuno con differenti difficoltà nel raggiungere una cristallinità adeguata per dispositivi a transistor. I precursori utilizzati sono TMG (trimetilgallio) e NH_3 (ammoniaca). La preparazione del GaN è complessa: sul substrato di silicio vengono depositati AlN (nitruro di alluminio) e AlGaIn. La barriera di AlN è indispensabile perché gallio e silicio reagiscono tra loro con formazione di leghe e di nitruro di silicio (SiN), un policristallo non idoneo per applicazioni elettroniche. La crescita epitassiale del GaN è inol-

tre ostacolata da difetti e impurezze che possono compromettere le prestazioni elettriche e ottiche del dispositivo.

Lo strato di AlN è instabile e sono in corso studi per ottimizzarne la deposizione. Una possibile soluzione consiste nel depositare alluminio su silicio in un reattore con idrogeno (H_2) e ammoniaca (NH_3) a bassa temperatura [2]. Successivamente si realizza uno strato cuscinetto per ridurre il disallineamento reticolare, seguito dalla crescita epitassiale di uno strato più spesso di GaN.

La Fig. 3 mostra la struttura del dispositivo GaN una volta completato [6]. Il disallineamento reticolare del 17% tra silicio e GaN genera stress e numerose dislocazioni. Per questo motivo si utilizza un cuscinetto di AlN di circa 100 nm, seguito da uno strato di $Al_{0,3}-Ga_{0,7}N$ di 2-3 μm , che migliora la planarità e crea condizioni favorevoli alla crescita degli strati successivi. Uno stress compressivo compensa quello di trazione dovuto al disallineamento termico, riducendo la deformazione del wafer prima della crescita del GaN [6, 7].

Sulla struttura così formata si deposita AlGaIn, che ospita uno strato di gas elettronico bidimensionale

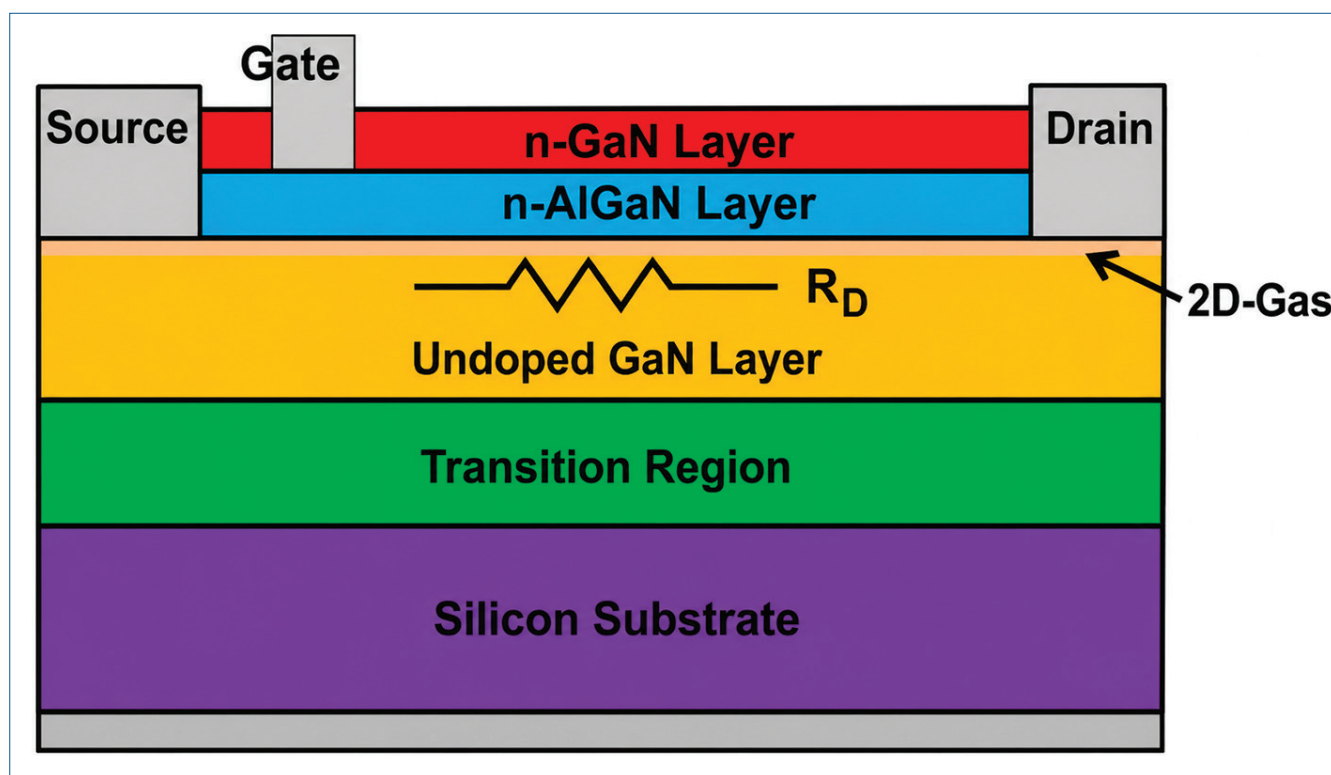


Fig. 3 - Struttura GaN con transistor ad alta mobilità [6]



(2-D gas), responsabile della conduzione a bassa resistenza tra i contatti. Sopra questo strato viene poi depositato GaN purissimo, formando un diodo che funziona come interruttore unidirezionale tra catodo e anodo.

Il GaN può operare fino a 650 V e sono in corso sviluppi per raggiungere tensioni più elevate, grazie alle sue prestazioni superiori in alta frequenza e alta tensione [8]. Difetti superficiali superiori a 10^8 cm^{-2} riducono però la capacità di sopportare alte tensioni, limitando i dispositivi a un massimo di 800 V [8, 9].

I principali difetti e impurezze includono:

- difetti puntuali (interstiziali, vacanze, sostituzionali), che introducono livelli energetici indesiderati;
- dislocazioni, originate dallo stress da disallineamento reticolare;
- linee di scorrimento e graffi superficiali, spesso localizzati ai bordi;
- impurezze come ossigeno e carbonio, dannose per il chip;
- contaminazione metallica e difetti superficiali, che possono ridurre drasticamente la resa produttiva.

Questi difetti compromettono l'affidabilità alle alte tensioni, motivo per cui dispositivi oltre 800 V non sono ancora disponibili. I dispositivi GaN presentano una resistenza di conduzione molto bassa e generano meno calore rispetto a quelli in silicio [9]. La mobilità elettronica, pari a circa $2000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, è superiore a quella del silicio ($1500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) e, dopo il drogaggio, il GaN mostra tempi di commutazione più rapidi.

Queste caratteristiche rendono il GaN particolarmente adatto a dispositivi RF per comunicazioni (5G, 6G), data center, server, convertitori di potenza e treni ad alta velocità. L'alta frequenza consente inoltre di ridurre induttori e condensatori mantenendo elevata efficienza.

Conclusioni

Le prestazioni del nitruro di gallio rispetto al silicio tradizionale aprono prospettive significative per nuove applicazioni industriali. La possibilità di migliorare l'efficienza dei semiconduttori e ridurre i consumi energetici favorisce l'esplorazione di altri materiali a larga banda di conduzione, come il carburo di silicio (SiC), già diffuso nell'industria

automobilistica, il fosforo di indio (InP) per le comunicazioni 6G e il cristallo beta dell'ossido di gallio (Ga_2O_3), apprezzato per i costi competitivi. Nei prossimi anni i dispositivi WBG, e in particolare il GaN, avranno un ruolo sempre più centrale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] [What is d-GaN, E-GaN and v-GaN power? - Power electronics tips](#)
- [2] M. Di Paolo Emilio, Handbook 'GaN and SiC technologies', Delfino Editore, 2023.
- [3] [Yole: presentation information, SiC and GaN Power Mos market in 2029 - CS conference \(2025\)](#)
- [4] F. Shimura, Semiconductor Silicon Crystal technology, Academic Press, 1989.
- [5] B. Vigna *et al.*, Silicon Sensors and actuators, Chapter EPI and Thin film deposition, Springer, 2022.
- [6] J. Baliga, *Semiconductor science technology*, 2013, **28**, 074011.
- [7] T. Oka *et al.*, *Applied Physics Express*, 2015, **8**, 54101.
- [8] D. Marcon: 'AC/DC and DC/DC Power Conversion systems are made smaller, more efficient, and cheaper thanks to Innoscience's discrete and integrated GaN 30 V-700 V price-competitive devices', WBG ARROW Conference, Verona, 2025.
- [9] IMEC GaN-on-Si Benchmarking Data, GaN Conference and Reports IEDM, 2022.

Advanced Semiconductor Materials: Gallium Nitride

Gallium nitride (GaN) is a wide bandgap semiconductor material with superior electron mobility, high current density, and high breakdown voltage. These properties enable the development of high-efficiency, high-output power devices for applications ranging from consumer electronics to automotive and industrial power systems. This paper provides an overview of GaN's material characteristics, device structures, and market trends, with a focus on its advantages over traditional materials such as Silicon (Si), Silicon carbide (SiC), and Gallium arsenide (GaAs).