



بلورات ماس مفردة مطعمة بالبرون بكثافة عالية لاستخدامات الكترونية عالية الطاقة

Thick boron doped diamond single crystals for high power electronics

J. Achard, F. Silva, R. Issaoui, O. Brinza, A. Tallaire, H. Schneider , K. Isoird , H. Ding, S. Koné, M.A. Pinault, F. Jomard, A. Gicquel

الخلاصة

مزود طاقة بنمط تبديلي (SMPS أي Mode Power Supply Switch) هو الان يستخدم بكثرة للتحكم ولتحويل الطاقة الكهربائية من 1W إلى MW. في هذا السياق، توليف واستخدام مواد شبه موصلة بفجوة طاقة عريضة لها خصائص فيزيائية رائعة عن السليكون. ولهذه الخصائص النوعية (الموصلية الحرارية وجهد القطع وحركة حاملات الشحنة و.....) فان الماس يعتبر مادة واعدة. ولكن النجاح في استخدامها في الطاقة الكهربائية الالكترونية يعتمد اساسا على قدرتها تزود حاملات شحنة من خلال تطعيم المواد بطريقة يتحكم بها. بالاخض نمو مواد مطعمة بالبرون بكثافة عالية مطلب اساسي لتطوير مكونات رأسية تسمح، كما هو موضح بالنمذجة، بالحد من المقاومات المتواليه للاجهزة. شروط الترسيب المطلوبة للحصول على معدل نمو مرتفع، ومواد مطعمة بكثافة عالية بالبرون وبجودة عالية باستخدام تقنية ترسيب البخار الكيميائي المدعم بالبلازما (MPACVD أي plasma assisted chemical vapour deposition) موضحة هنا. كما سنوضح ايضا بالاخض ان معدل نمو عالي ومواد بجودة عالية يمكن الحصول عليها بكثافة طاقة ميكروويف عالية يأتي على حساب تركيز البرون، ولذلك يجب ان نصل الى نقطة مفاضلة. النتائج الاولى على تطعيم البرون في بلورة ماس مفردة موضحة مع علاقتها بالخواص الكهربائية لديود حواجز شوكتي وليبيسيديو الراسي (SBD أي Schottky Barrier Diodes). بالاخض مجال كهربى حرج يعادل 1.3 MV/cm تم الحصول عليه عمليا بنسبة تقويم 109. في نفس الوقت، تم الوصول لكثافة تيار مقاربة لـ 1500-2000 A cm⁻²، مما يوضح اهمية الماس لتطبيقات الكترونية كهربية.



1. مقدمة

منذ اتفاقيات Kyoto اصبح الاحتباس الحراري global warming اكثر المواضيع اهتمام وتقليل انبعاثات غاز الدفيئات الحرارية اصبحت هدفا اساسيا في الدول المتطورة. من احد العناصر الاساسية للنجاح في استبدال طاقة النفط بطاقة مستدامة مثل تربينات الرياح والخلايا الشمسية وتطوير حلول للاستخدام اكثر من مصدر خليط لتوليد الطاقة. هذا سوف يؤدي الى تطوير أنظمة توصيل التيار الكهربائي وتحويل الطاقة لكي نحصل على كفاءة تحويل عالية في صورة مناسبة لتوصيل الشبكي. المصطلح العام المستخدم للإشارة الى كل هذه المعدات هو FACTS وهي اختصار لـ Flexible AC Transmission System أي النظام المرن لنقل التيار الكهربائي، والذي يشمل اجهزة نقل التيار المتردد والتيار المستمر، واجهزة استقرار التيار الكهربائي وشبكات التوزيع. أنظمة الطاقة في عصرنا هذا تعتمد اساسا على بوابة ترانزستور ثنائي القطب المعزولة Insulated Gate Bipolar Transistor والتي تعرف بالاختصار (IGBT)، وهي تقنية في بداية تطورها. جهد الانقطاع المنخفض لمثل هذه الاجهزة يتطلب ان نوصل عشرات منها على التوالي، هذا بالإضافة على التكلفة المرتفعة لها مما يجعل النظام النهائي معقدا ويصعب التحكم فيه وتشغيلها. علاوة على انه نظرا حد درجة الحرارة المنخفضة للتشغيل لمادة السليكون (150°C) وانخفاض الموصلية الكهربائية ($150 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)، فان هذه الاجهزة تتطلب أنظمة تبريد ضخمة. كل هذه الامور تضع قيود وحوارج امام تطوير طاقات بديلة.

في هذا السياق، تكوين واستخدام مواد شبه موصلة تمتلك فجوة طاقة عريضة اكسبت السليكون خصائص فيزيائية رائعة، مواد مثل SiC و GaN قادرة على التفوق على السليكون المكافئ لها نتيجة لقدرتها العالية على التوصيل الحراري وجهد القطع لها. اجهزة الطاقة الالكترونية المعتمدة على هذه المواد الان تخضع لانتقال من المجال البحثي الى منتجات تجارية. بالمقارنة تقنية الماس لازالت في بداياتها. ولكن هذه المواد تمتلك خصائص لا مثيل لها [1] مثل الموصلية الحرارية تبلغ $2000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (أي 5 مرات اعلى من النحاس) وكذلك جهد القطع يصل الى 10 MV cm^{-1} (أي اكبر بـ 12 مرة من السليكون) وهذا بالتأكيد سوف يرفع من كفاءة اداء الاجهزة. بجانب ارتفاع قابلية حركة الالكترونات والفجوات في المدى من 2000 إلى $4500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ و $1800-3800 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ عند درجة حرارة الغرفة على التوالي [2-6]، كذلك ثابت العازلية المنخفض والثبات الكيميائي تجعلها قادرة على العمل في بيئة قاسية. الماس بالتأكيد يعتبر المادة الافضل لالكترونيات. باستخدام تقنية ميكروويف البلازما المدعمة بالترسيب الكيميائي (microwave MPACVD plasma assisted chemical vapour deposition) يمكن الحصول على افلام رقيقة بجودة عالية



ونقاوة كبيرة من بلورات احادية من الماس مع خليط من الميثان والهيدروجين تحت ضغط متوسط. اذا كان النيتروجين المستخدم كخلفية اقل من بضعة ppb (أي جسيم لكل بليون) فان شوائب المستقبلات من البرون التي لها طاقة تنشيط تعادل 0.36 eV يمكن بسهولة ان تقحم من خلال اضافة مركبات تحتوي على البرون في طور غازي. تركيز الفجوات في المدى من 1016 إلى 1021 cm^{-3} يمكن ان نصل لها من خلال اتجاهات تبلور مختلفة [7,8] ولكن على سمك صغير نسبيا لمستويات تطعيم مرتفعة. على الجانب الاخر تطعيم النوع n لا يزال القضية الاعظم لان الفوسفور هو المانح الوحيد الاكثر كفاءة، لا يمكن ان يقحم بسهولة في بلورات ذات (100). علاوة على ذلك فان طاقة تنشيطها تقع في مستوى اعمق في فجوة الطاقة (0.6eV) [9, 10] وهذا يقيد بشدة تركيز الحاملات في درجة حرارة الغرفة. ولهذا، في البداية يجب ان يتم التعامل مع اجهزة تعتمد على ماس بسيط احادي القطبية لاجهزة الكترونية [11,12]. اجريت العديد من التجارب (دايودات Schottky [13-17] او ديودات بيسيدو الرأسية pseudo-vertical [18-25]) وبينت فعالية الماس بالاخص في الحفاظ على الجهد. ولكن لسوء الحظ، في مثل هذه التراكيب، فان سلوك الاستقطاب الامامي لم يكن مرضيا تماما لان مقاومة كبيرة لازالت تحد من كثافة التيار.

لكي يتم تطوير اجهزة الكترونية معتمدة على الماس ذات جهد عالي وتيار عالي ودرجة حرارة عالية، فان الكثير من العقبات التكنولوجية يجب التغلب عليها. بالاخص صناعة مكونات رأسية تسمح بتخفيض كبير للمقاومات على التوالي تتطلب ارضية ترسيب substrates من الماس المطعم بالبرون. بعض المحاولات لصناعة مثل هذه التراكيب تم انجازها من خلال استخدام درجة حرارة عالية وضغط عالي لبلورات ماس مفردة مطعمة بالبرون [26] ولكن المقاومة العالية لارضيات الترسيب هذه لازالت تعيق اداء هذه الاجهزة وهذا يرتبط بالاساس بالشوائب المشتركة في تلك البلورات مثل النيتروجين والكروميوم او النيكل. حديثا تمكن Kumaresan et al. [27] من تصنيع ديود شوكتي رأسي باستخدام الترسيب بالتبخير الكيميائي CVD على ارضيات ماس +P. بالرغم من الحصول على مجال قطع عالي الا ان عيوب في الطبقة المرسبة بالتبخير الكيميائي قد اوضحت القضية الاساسية. في هذا البحث تم دراسة مشكلة تكون افلام سميكة مطعمة بالبرون بتركيز عالي باستخدام الترسيب بالتبخير الكيميائي المعززة بالبلازما.



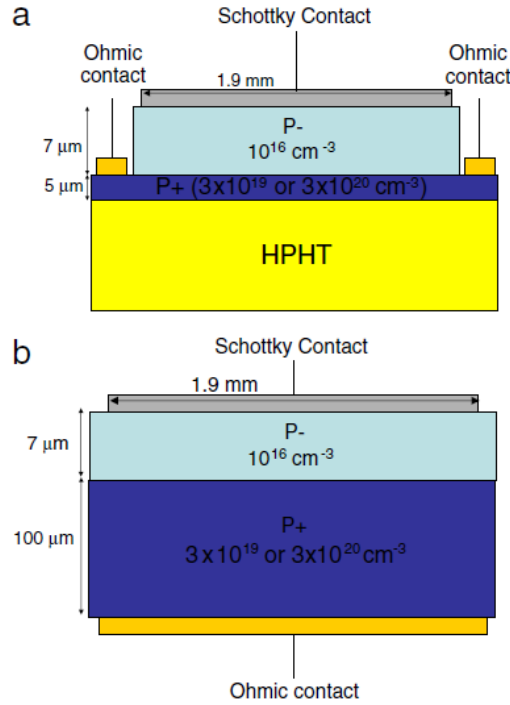
في الجزء الاول، وصف لمحاكاة تشكيلات مختلفة من ديود شوكتي Schottky diode. وسوف يتبين ان الشكل الهندسي الرأسي له اهمية خاصة في حالة التشغيل عند تيار عالي والذي يتطلب استخدام توصيلات كهربية كبيرة. في هذا النوع نحتاج الى استخدام افلام سميكة لكي نزود الاجهزة بقوة ميكانيكية يسهل التعامل معها. في مجال التطوير الصناعي لمثل هذه الاجهزة، فانه من الاساسي ان ندمج افلام ذات جودة عالية مع معدلات نمو عالية بقدر الامكان، وهذا يمكن ان نحصل عليه فقط تحت ظروف نمو محددة. في الجزء الثاني نعرض اول نتائج عملية حصلنا عليها للتطعيم مع توضيح شروط النمو التي تسمح بالحصول على افلام سميكة مطعمة بالبرون. الجزء الاخير يركز على عملية التصنيع للاجهزة الالكترونية المعتمدة على الماس. عرضنا ايضا خصائص اول مجموعة ديودات شوكتي. كما سوف نبين ان نتائجا اظهرت بقوة امكانية استخدام الماس لمثل هذه التطبيقات.

2. تعريف المكونات الهندسية والقيود على عملية النمو

1.2 المكونات الهندسية Component geometry

الهدف الاساسي هنا هو تعريف المتطلبات الهندسية وخواص افلام الماس المطعمة بالبرون لكي يتم تصنيع دايود شوكتي يمتلك كفاءة عالية. هذا النوع من الاجهزة يجب ان يتحمل الجهد العالي (اعلى من 10 kV) ويسمح بتدفق تيار عالي تحت انحياز امامي. الشرط الاخير يتطلب حالة مقاومة on-state resistance (R_{on}) منخفضة بقدر الامكان مدمجة مع سطح كبير نسبيا للجهاز. بالفعل، اذا كان ارتفاع التيار الى مئات الامبير كما هو متوقع، بكثافة تيار تساوي 5000 A cm^{-2} فان مساحة 2 mm^2 اساسية. بالاعتماد على هذه الابعاد على انها محددات فان مكونات الشكل الهندسي الرأسي يمكن ان تستخدم كما هو معتاد في تكنولوجيا السليكون او SiC - لان مقطع هذا العنصر يتم تكبيره للحد من المقاومة على التوالي.

هذه النقطة بالخاص وضحت باستخدام المحاكاة بالمقارنة مع ديود البيسيدو الرأسي وديود الشوكتي الرأسي (انظر الشكل 1 والجدول 1)



الشكل 1. التركيب الهندسي لديودات شوكتي المستخدمة للمحاكاة (a) ديود ببيدو الرأسي و (b) ديود رأسي. لهدف التوضيح فان الرسم ليس بمقياس رسم.

ديود ببيدو الموضح في الشكل a1 صنع من طبقة P+ بسمك $5 \mu\text{m}$. استخدمت قيمتين للتطعيم في نموذج التركيب وهما $(3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ و $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). تعتمد توصيل شوكتي على طبقة فعالة P- مطعمة عند 10^{16} cm^{-3} وطول التوصيلات 1.9 mm . اختير سمك $7 \mu\text{m}$ لضمان جهد انعكاس بقيمة 1.2 kV . رسبت توصيلات اومية على طبقة P+ بعد انتزاع طبقة P-. الديود الرأسي (الشكل b1) صنع من طبقة P+ بسمك $100 \mu\text{m}$ مع نقاط توصيل اومية على الجانب الخلفي. طبقات P- و P+ لها نفس خصائص التطعيم لتركيب ببيدو الرأسي. بدأ بهذين التركيبين الهندسيين، تم حساب R_{on} والقيم المقابلة لها وهذا ما هو موضح في الجدول 1.

من هذه النتائج، يظهر بوضوح ان استخدام التركيب الرأسي يسمح بتقليل R_{on} بحوالي 4 الى 5 مرات بالاعتماد على درجة الحرارة. بالفعل في هذا الشكل مقطع التوصيل (المساحة التي يتدفق من عبرها التيار) تعرف بتوصيل شوكتي للطبقة P- والتوصيل الاومي للطبقة P+ كما هو موضح في الشكل a2. ولهذا R_{on}

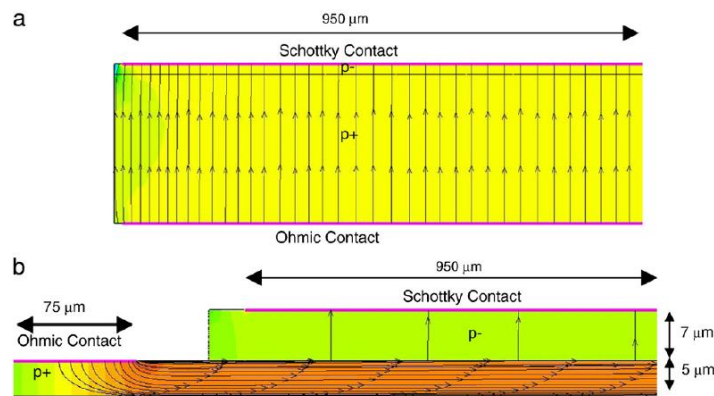
هي ناتجة عن مقاومة P-. في الشكل البيسيديو الرأسي خطوط التيار محصورة في طبقة P+ سمكها 5 μm (انظر الشكل b2) ومقطع التوصيل في الطبقة P+ اقل بكثير من طبقة P- (مساحة توصيل شوكتي). في هذه الشروط فان المقاومة الكهربائية للطبقة P+ تصبح المسيطرة.

النقطة الاخيرة التي علينا ان وضحها هي ان التركيب الرأسي يستخدم تطعيم منخفض ($3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) بدلا من ($3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) كان له تأثير اقل على R_{on} من البيسيديو الرأسي.

الجدول 1

مقاومات على التوالي لديودات بسيدو رأسية وديودات رأسية حسب كدالة في التطعيم والسمك لطبقات P+ و P- عند درجة حرارة 300 K و 600 K

	p- thickness (μm)	p- doping (B cm^{-3})	p+ thickness (μm)	p+ doping (B cm^{-3})	R_{on} @ 300 K (Ω)	R_{on} @ 600 K (Ω)
Pseudo-vertical diode	7	10^{16}	5	3×10^{19}	5.6	4.5
Verticale diode			100	3×10^{20}	0.71	0.91
				3×10^{19}	0.23	0.17
				3×10^{20}	0.21	0.16



الشكل 2. توزيع خطوط التيار في نماذج تراكييب (a) ديود رأسي، و (b) ديود بيبيديو رأسي.



زيادة بمقدار 5% في Ron حسبت عندما قلل التطعيم. في الحقيقة في حالة التركيب الرأسي المساحة الكبيرة للمكونات سمحت بالتكيف بسهولة مع النقصان في التطعيم. ولهذا في هذا الشكل فان التطعيم الكبير للماس غير ضروري.

هذه النتائج تشرح اهمية تطوير عملية مناسبة لنمو افلام سميكة مطعمة بالبرون لكي نحصل على تراكيب رأسية. في مجال التطوير الصناعي فان العملية يجب ان تضمن معدلات نمو عالية قدر الامكان.

2.2 القيود على عملية النمو Constraints on the growth process

الترسيب بالبخار الكيميائي CVD للماس تم الحصول عليه من تراكيب غازية تحتوي اساسا على الكربون والهيدروجين وبالعادة هي H_2-CH_4 . احد المركبات الاساسية للنمو هو الهيدروجين الذري [28-31]. هذه الانواع الكيميائية معروفة بانها تعمل على استقرار نمو الماس على السطح من خلال تشبع روابط التعليق. كما انها تؤدي الى انتزاع محدد للاطوار التي ليست بالماس وتعمل على تكون مواقع نشطة من ناحية، ومن ناحية اخرى تراكيب تحتوي على الكربون في طور الغاز، الاخير ايضا اساسي لنمو الماس. ولهذا فانه من المفضل جدا زيادة كثافة الهيدروجين الذري بقدر الامكان في البلازما اذا رغب احد ان يحسن كلا من معدل النمو وجودة الماس. اجريت بحوث في LIMHP واوضحت ان توليد هيدروجين ذري بكفاءة يعتمد على التحلل الحراري لجزيئات الهيدروجين، وهذه عملية تحدث فوق درجات حرارة الغاز عند 3200 K [32-35].

ولهذا فان العمليات التي تشمل تنشيط قوي لطور الغز لتصنيع انواع قادرة على تزويد كلا من درجة حرارة الغاز فوق 3200 K تؤدي الى معدلات نمو تصل لعدة ميكرون في الساعة وتحكم كافي في ظروف النقاء لتصنيع ماس بطريقة ترسيب البخار الكيميائي مناسب للاستخدامات الالكترونية. تجويف ميكروويف بلازما ذو طاقة عالية يعمل عند ضغط متوسط يحقق هذه المطالب. كثافة طاقة الميكروويف (MWPD) أي (Microwave power density)، أي النسبة بين طاقة الميكروويف المقحمة في البلازما، والتي تعتبر عامل اساسي، يجب ان يكون كبيرا كفاية ليسبب التحلل الحراري لجزيئات الهيدروجين. النتائج التي تم الحصول عليها من نماذج البلازما احادية البعد تبين ان اعلى درجة حرارة غاز يمكن الوصول لها في مركز المفرغ الكهربائي (انظر الشكل 3) ولهذا فان اعظم تواجد للهيدروجين الذري سوف يوجد هناك [36,37].



نمو انواع الكربون الداخلة في نمو الماس هي اساسا رديكال ميثل (CH₃) [38-45]. انتاج CH₃ محكوم بالتفاعل الكيميائي CH₄+H CH₃+H₂. كثافة عالية من CH₃ يمكن الحصول عليها فقط اذا تحلل الهيدروجين (يحدث عند درجة حرارة غاز مرتفعة) بكفاءة. ولكن درجة حرارة غاز مرتفعة جدا تؤدي الى تحول هذه الراديكال إلى انواع من الكربون [46-48]. درجة الحرارة الافضل لتكوين راديكال CH₃ تقع بين 1500 K و 2200 K. ومع ذلك، لان درجة حرارة الارضية substrate تكون عند 1100 K، يحدث تدرج في درجة الحرارة بين قلب البلازما الساخن والارضية. كمية كبيرة من الهيدروجين الذري تنتج في قلب المفرغ بينم كثافة عالية من الميثيل توجد بالقرب من سطح الارضية (انظر الشكل b3 و c).

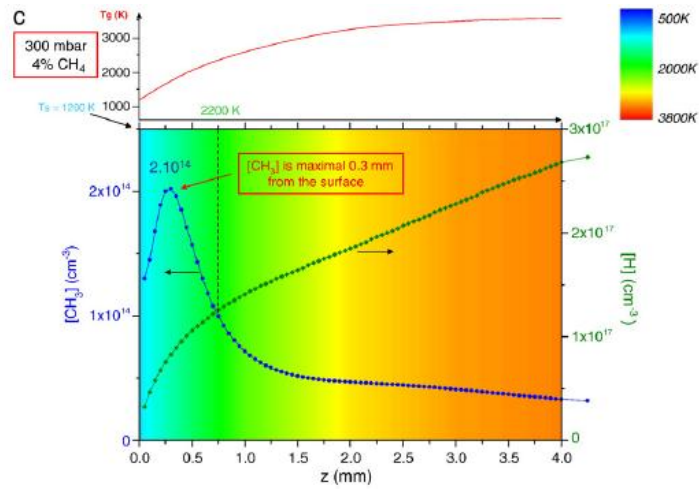
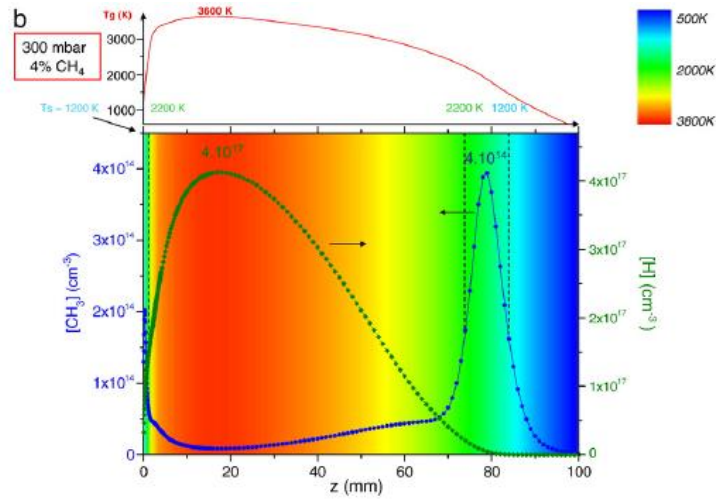
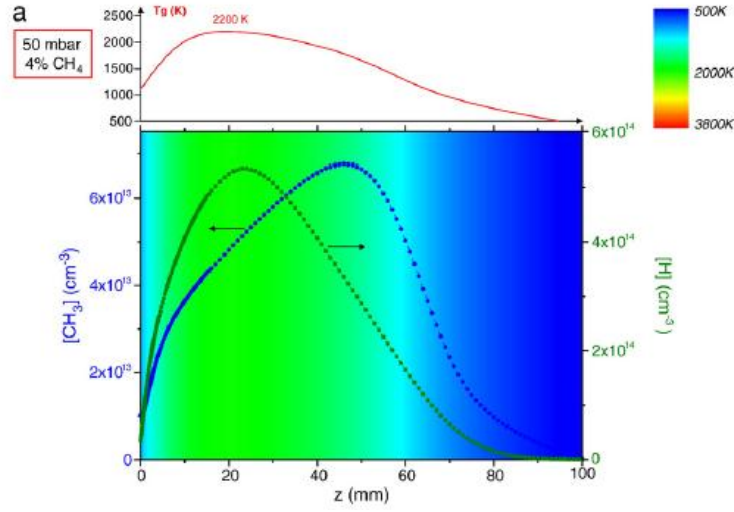
هذا يشكل الاساس لهذه النتائج التي حددناها لظروف البلازما المسؤولة عن نمو افلام الماس المطعم بالبرون بدرجة عالية. تستخدم MWPD بكثرة ولكن القليل من البحوث هو نظام البلازما هذه اجري حتى الان [49] لدرجة عالية من التطعيم بالبرون.

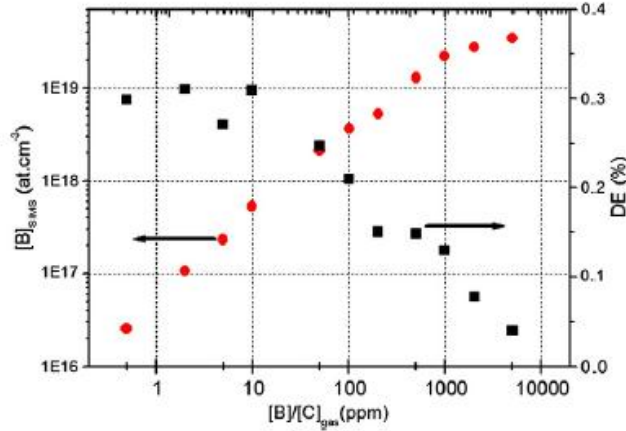
3. النتائج العملية على افلام الماس المطعمة بالبرون

1.3 تأثير تركيز diborane (مركب من البرون والهيدروجين) في طور الغاز

بالاخذ بعين الاعتبار الجزء السابق، تم تحضير مجموعة اولية من العينات. تم اجراء الترسيب على 3×3×1.5 mm³ من ارضيات من HPHT Ib. قبل النمو، كل الارضيات تم تنظيفها كيميائيا للتخلص من الملوثات العضوية والمعدنية وعرضت بعد ذلك لبلازما H₂/O₂ وهذه المعالجة لها فوائد خاصة في حالة نمو الافلام السمكية [50,51]. تم تصميم مفاعل تجويف الميكروويف في LIMHP بالتعاون مع شركة Plassys، لكي نضمن اقصى ترابط للميكروويف تفاصيل وشرح المفاعل موضح في المرجع [52].

تم تثبيت MWPD على 100 W cm⁻³، ودرجة حرارة الارضية عند 850°C وتركيز الميثان عند 7%. تم ضبط زمن الترسيب للحصول على افلام بسمك 20 µm. هذه الشروط المستخدمة للنمو تقابل افضل شروط للحصول على مواد نقية بجودة عالية، وافضل معدل نمو وافضل مورفولوجي [53]. تم تغيير نسبة الغاز [B]/[C] في حدود 0.5 إلى 5000 ppm باضافة B₂H₆ في طور الغاز. ادخال البرون في الماس كما تم قياسه بواسطة SIMS موضح في الشكل 4 وموضح العلاقة الخطية حتى 1000 ppm [B]/[C]_{gas}.





الشكل 4. تركيز البرون في الماس مقاس بواسطة SIMS وكفاءة التطعيم كدالة في نسبة $[B]/[C]_{\text{gas}}$.

بعد هذه القيمة لوحظ تشبع وهذا تم تأكيده بالنقصان الشديد في كفاءة التطعيم (DE أي doping efficiency) كما هو معرف بالمعادلة (1).

$$DE = \frac{[B] / [C]_{\text{diam}}}{[B] / [C]_{\text{gas}}} \quad (1)$$

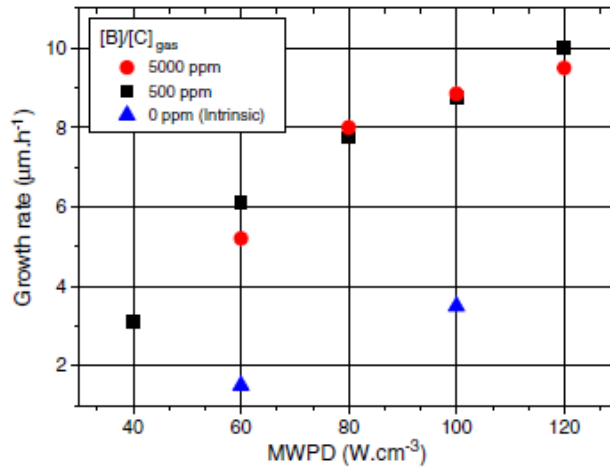
حيث $[B]/[C]_{\text{diam}}$ هي النسبة بين تركيز البورون (كما قيس بواسطة SIMS) وتركيز الكربون في فلم الماس.

هذه التوجه تم الاشارة اليه ايضا في المرجع [54] لـ Tokuda et al. ويعزى لتطور كيمياء البلازما المرتبطة باضافة البرون في طور الغاز. ومع ذلك، دراسات طيفية حديثة اجريت في مختبرنا بينت ان الزيادة في الـ diborane في طور الغاز حتى 20,000 ppm لا تعدل درجة حرارة الالكترود ولا حتى درجة حرارة الغاز، هذين المعاملين معروفين جدا للتحكم في كيمياء البلازما [55]. هذا التوجه من المرجح ان يكون مرتبطا بالية الاقحام في المواد. بالفعل عدد مواقع الاقحام المتوفرة يعتمد على ظروف البلازما (كثافة الهيدروجين الذري و CH_3) كذلك حالة سطح ارضية الماس (الحواف المدرجة والعيوب والخ) وقصورها. فوق قيمة محددة لـ $[B]/[C]_{\text{gas}}$ ، فان اقحام البرون لا يزداد خطيا ويظهر بعض التشبع. موضوع اخر قد يكون مرتبطا بمورفولوجي السطح والذي يطرأ عليه تحسين بوجود كمية كبيرة من البرون كما سوف

يوضح فيما بعد. لان وجود العيوب يكون دائما مصاحبا لوجود الشوائب [56]، وتحسين مورفولوجي السطح قد يكون على حساب منع اقحام البرون في الشبكة البلورية. ولهذا لكي نزيد تركيز البرون في الفيلم ونصل الى حالة الانتقال المعدني بقوة فانه من الضروري ان نزيد بشكل كبير كمية diborane المضافة لطور الغاز. ولسوء الحظ نسبة $[B]/[C]_{gas}$ اعلى من 5000 ppm تصبح البلازما غير مستقرة نتيجة لتكوين السخام الذي يتراكم ويمنع الترسيب لفترة اكثر من ساعتين وبالتالي يمنع الحصول على افلام سميكة.

2.3 دراسة تأثير MWPD على نمو افلام الماس المطعم بالبرون

في الجزء السابق، تم توضيح ان استخدام ظروف MWPD عالية مفضلة لنمو سريع لبلورات مفردة عالية الجودة. ولكن هذه الظروف، والتي تعتبر المفضلة لتصنيع اجهزة طاقة رأسية لا يمكن الوصول لها بسهولة.



الشكل 5. تقييم معدلات النمو كدالة في MWPD باستخدام $[B]/[C]_{gas}$ لـ 500 و 5000 ppm. وموضح ايضا معدل النمو للمواد النقية لاثنين MWPD

وهذا يعود الى موضوعين اساسيين. الاول. ان اقحام البرون يميل الى التشبع عند نسبة $[B]/[C]_{gas}$ عالية لمستوى يصل إلى $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. والموضوع الثاني هو استخدام كميات كبيرة من diborane (N5000 ppm) يولد سخام ويجعل البلازما غير مستقرة.



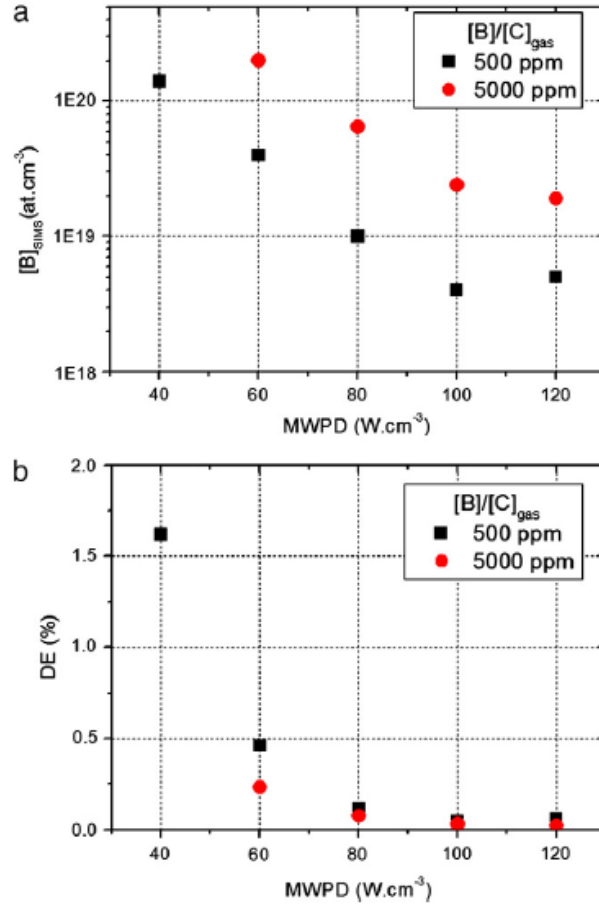
من الملاحظ هنا ان كفاءة التطعيم التي تم الحصول عليها في شروط MWPD العالية هي عادة اقل بكثير من تلك التي مدرجة في البحوث العلمية [54,57]. ونحن نعزي هذا التأثير إلى جودة المواد العالية كما سوف نناقش هذا الموضوع لاحقا. تأثير MWPD على اقحام البرون لم يسبق لاحد ان نشره حتى الان.

في هذه الدراسة، قمنا بترسيب افلام ماس مطعم بالبرون عند MWPD عند قيم متغيرة من 40 إلى 120 W cm⁻³، ولنسبتين من [B]/[C]_{gas} هي 500 و 500 ppm. كلا من تركيز CH₄ و درجة حرارة الارضية تم الحفاظ عليهما ثابتتين عند 5% ودرجة حرارة 850°C على التوالي. معدل النمو لترسيب الافلام موضح في الشكل 5.

يوضح معدل النمو زيادة كبيرة من 3 إلى 10 µm/h عندما يزداد MWPD من 40 إلى 120 W cm⁻³. هذا السلوك متفق مع دراسات البلازما المعروفة مسبقا. لا يوجد اختلاف ملحوظ بين نمو الافلام عند نسبة 500 [B]/[C]_{gas} و 5000 ppm. ولكن في الشكل 5، موضح معدل نمو عينتين في نفس الظروف ولكن باستخدام مفاعل لم يسبق ان اقحم فيه diborane. من المدهش ان معدل النمو انخفض بنسبة 3 مرات. بطريقة او بأخرى افيد بنفس التأثير مع شوائب النيتروجين، لان استخدام بضع ppm من هذه الشوائب معروف على انه يعمل على تسريع معدلات الترسيب بشكل كبير بمعامل يصل لـ 10 مرات [58,59]. فوق مستوى معين (بضع مئات من ppm) فان اضافة المزيد من النيتروجين لا يؤثر على معدل النمو. في حالة البرون، يبدو هذا التأثير ان يكون اقل لان معدل النمو يزداد بمعامل يصل الى 3 مرات فقط. الاليات المسؤولة عن ذلك من المحتمل ان تكون مختلفة.

الشكل a6 يوضح اقحام البرون كدالة في MWPD. نلاحظ ان عند كمية من diborane في طور الغاز، فان كلما كانت MWPD اقل كلما كان اقحام البرون اعلى. عند 60 W cm⁻³ و اقل من ذلك نصل الى الانتقال من شبه الموصل الى المعدن.

الاصل في النقصان في DE عند MWPD عالية (انظر الشكل b6) غير مفهوم تماما. قد يكون بسبب تطور اصناف كيميائية في البلازما. بالفعل الزيادة في MWPD عادة ما تكون مصحوبة بزيادة في درجة حرارة الغاز.

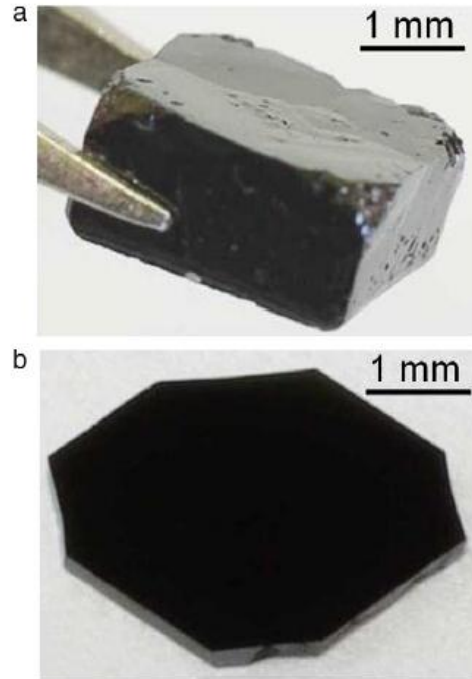


الشكل 6. تقييم تركيز البرون بواسطة قياسه بـ SIMS (a) و DE (b) كدالة في MWPD لـ $[B]/[C]_{gas}$ لـ 5000 ppm و 500 ppm.

التفاعلات الكيميائية التي تحدث في البلازما سوف تؤدي الى تحلل قوي لاصناف BH_x . الاصناف الكيميائية الداخلة في اقحام البرون في الفيلم يمكن ان تستنفذ، وهذا يحد بقوة DE. يجري الان دراسة نموذج البلازما احادي الابعاد وكذلك القياسات الطيفية لكي نربط هذه النتائج مع كثافة الاصناف في البلازما.

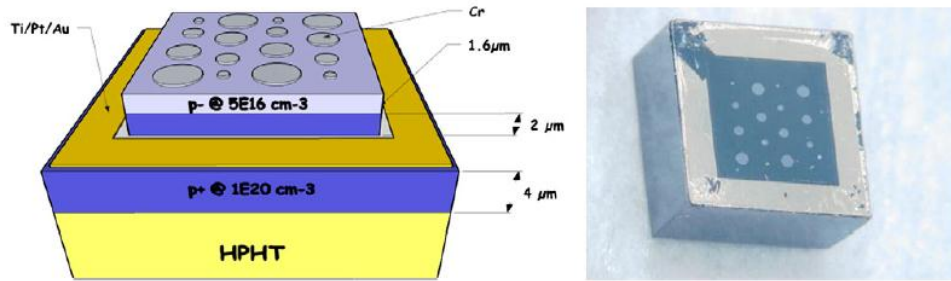
MWPD (W.cm ⁻³)	120	100	80	60	40
[B]/[C] _{gas} 500 ppm					
[B]/[C] _{gas} 5000 ppm					

الشكل 7. تأثير الـ MWPD على مورفولوجي السطح عند 500 ppm و 5000 ppm لـ $[B]/[C]_{gas}$



الشكل 8. (a) افلام مطعمة بالبرون مع ارضية من HPHT قبل القطع والسنفرة. (b) افلام الماس المطعمة بالبرون القائمة بذاته.

امكانية اخرى من الممكن ان تكون بسبب تطور تركيب الماس وجودة الفيلم والتي من الممكن ان تعدل من كفاءة اقحام البرون. وفي الواقع مورفولوجي السطح للافلام المتكونة موضح في الشكل 7 تبين ان لنسبة $500 \text{ppm } [B]/[C]_{\text{gas}}$ يحدث تراجع قوي في المورفولوجي باستخدام MWPD منخفضة. سطح الافلام مغطى باشكال هرمية كبيرة على السطح العلوي حيث وجدت بلورات unepitaxial [60]. لطاقة MWPD تساوي 100 W cm^{-3} واعلى، فان التحسين في مورفولوجي السطح يرتبط بزيادة الهيدروجين الذري وهذا متوافق مع المراجع [61,62]. لنسبة $5000 \text{ ppm } [B]/[C]_{\text{gas}}$ ، حصلنا على اسطح ناعمة على كامل مدى طاقة MWPD وهذا مؤشر على تحسين المورفولوجي باضافة البرون كما وصف بواسطة Tokuda [54]،



الشكل 9. صورة مقطعية وصورة ثلاثية الابعاد لتصنيع تركيب جهاز SBD

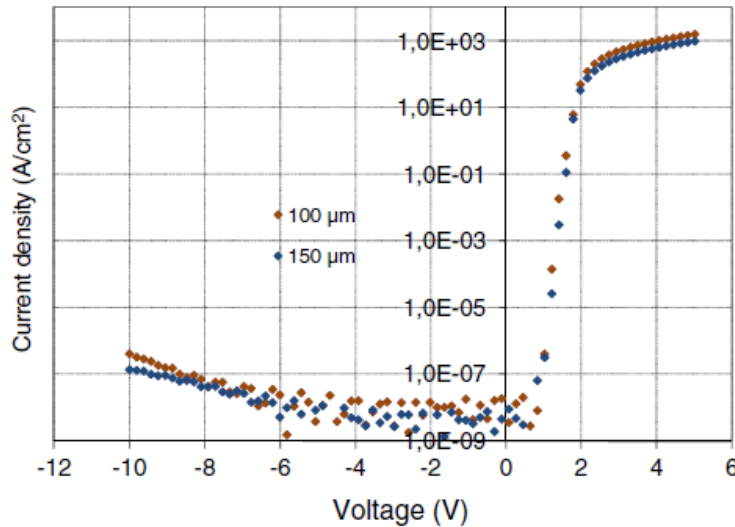
ولكن موضح هنا لنطاق واسع من MWPD. لافلام مترسبة عند 40 Wcm^{-3} و 5000ppm من $[B]/[C]_{\text{gas}}$ ، فان تركيز البرون عالي جدا حيث حصلنا على طبقة جرافيت داكنة والصورة غير موضحة هنا.

من هذه الدراسة نستنتج بوضوح انه بالرغم من استخدام طاقة MWPD منخفضة الا ان تحسين كبير يحدث لـ DE وهذا يمنع تكون السخام، وهذا لا يسمح دائما بالحصول على مورفولوجي جيدة. مفاضلة جيدة وجدت حديثا باستخدام MWPD عند 60 W cm^{-3} لنسبة $5000 \text{ ppm } [B]/[C]_{\text{gas}}$ ، تؤدي الى نمو فيلم سمكه $300 \mu\text{m}$ مطعم بكثافة عالية بالبرون والذي امكن نزعه من الارضية كما هو موضح في الشكل 8.

4. تصنيع وخصائص ديودات شوكتي والببيدو الرأسية

بموازاة نمو افلام ماس سميكة مطعمة بالبرون بكثافة عالية، تكنولوجيا تصنيع دايدو شوكتي بدأت بالتطور من افلام رقيقة مطعمة بالبرون لكي تحقق شوكتي وتوصيلات اومية. بالرغم من الدايدو المصمم رأسيا وجد انه اكثر استقلالا بالنسبة لاجهزة الطاقة، فان الشكل الهندسي قد اختير هنا هو دايدو بببيدو الرأسية (انظر الشكل 9). في الواقع هذا يتطابق مع المحاولة الاولى للوصول الى افضل عملية تصنيع لدايدوات شوكتي. بالموازاة فان دايدوات رأسية انتجت والنتائج سوف تنشر في مكان اخر. على ارضية ماس Ib HPHT ابعادها $3 \times 3 \times 1.5 \text{ mm}^3$ ، تم تكوين طبقة مطعمة بكثافة عالية سمكها $6 \mu\text{m}$ باستخدام MWPD متوسطة (50 W cm^{-3} ونسبة $[B]/[C]_{\text{gas}}$ تساوي 2000 ppm) للوصول الى تحول المعدن لشبه الموصل. طبقة اخرى تم ترسيبها في نفس شروط المفاعل سمحت باقحام محدود للبرون (بضعة ppm من $[B]/[C]_{\text{gas}}$ و 100 W cm^{-3}).

تركيب قممي mesa بابعاد $2 \times 2 \text{ mm}^2$ تم تشكيله في مركز العينة بواسطة انتزاع ICP، وتوصيلات Ti/Pt/Au اومية تم تبخيرها حول التركيب القممي mesa على طبقة سطحية مطعمة بكثافة عالية بالبرون ومن ثم تم تلدينها على درجة حرارة 500°C لمدة ساعة في جو من النيتروجين. توصيلات دائرية من الكروميوم باقطار مختلفة (100 و $150 \mu\text{m}$) تم ترسيبها على قمة التركيب mesa للحصول على توصيلات شوكتي.



الشكل 10. خصائص I/V لدايدوات الماس/Cr لاطول مختلفة من التوصيلات



1.4 التشخيص عند درجة حرارة الغرفة

منحنى خصائص I-V موضح في الشكل 10 لكلا اقطار الداويد. من هذه المنحنيات تم تحديد معاملات الداويد الرئيسية (الجدول 2).

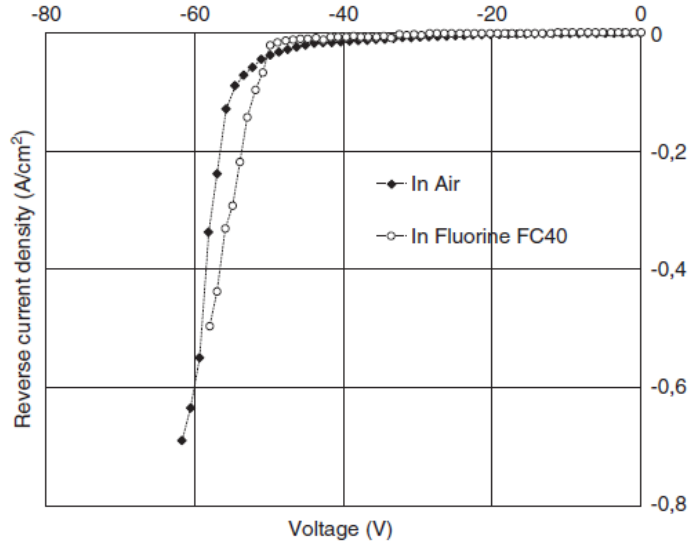
نسب التقويم كانت مرتفعة ووصلت الى 10^{10} ، وهذا مرتبط بكثافات تيار وصلت إلى 1500 A cm^{-2} كما هو موضح. بالرغم من ان التيار العكسي مرتفع جدا عندما يصل الجهد الى عشرات الفولت. هذا السلوك من المحتمل ان يكون مرتبطا بالعيوب التي لها اسباب مختلفة. العيوب الحجمية يمكن ان تحدث تسرب في المسارات في المادة [63,64] ويحدث توزيع متجانس للعيوب بالقرب من السطح عبر منطقة التوصيل يمكن يتصرف بشكل كهربى عندما يكون التطعيم عاليا وحواجز منخفضة في المناطق العالية [23].

قياسات التيار والجهد في حالة الانحياز العكسي اجريت على العينة وهي في الهواء او وهي مغمورة في سائل عازل (الفلورين FC40) والنتائج موضحة في الشكل 11. السائل العازل يمنع المجال الكهربى من التكسد حول حواف توصيلات شوكتي مما يسبب عطل دائم للجهاز. ظاهرة العطل في الماس لوحظت عند -55 فولت والتي تقابل مجال قطع كهربى يعادل 1.3 MV cm^{-1} ، اذا كان توزيع المجال المثلى داخل تطعيم منتظم للطبقة P- [60]. هذه القيمة لازالت اقل من التوقعات النظرية للماس (10 MV/cm) والذي يؤكد على ان التحديات لازالت قائمة على نمو الماس. بالرغم من ذلك هذه النتائج مشجعة جدا.

الجدول 2.

خصائص الداويد مقدره من منحنيات I-V

Contact length of the diodes (μm)	Direct current J_F (A/cm^2)	Reverse current J_R (A/cm^2)	Rectifying ratio J_F/J_R	Threshold voltage V_{th} (V)
100	1570	10^{-7}	10^{10}	1.9
150	980	10^{-8}	10^{10}	



الشكل 11. خصائص I/V العكسية لـ SBD Cr/ماس في الهواء والفلورين FC 40

من خلال هذه النتائج المختلفة يتضح ان التقنيات تسمح بتطوير شوكتي رأسي وهي على قدم وساق بالرغم من ان افلام بدون ارضية مطعمة بالبرون بكثافة عالية وبعيوب قليلة لازالت بحاجة الى تحسين.

5. الاستنتاج Conclusion

وضح نموذج دايمود شوكتي ان المركبة الرأسية فقط هي التي تضمن التشغيل عند تيار كهربائي عالي (اكثر من 100 A). مع هذا الشكل الهندسي فان المقاومة R_{on} يمكن ان تقل بمعدل يتراوح بين 4 إلى 5 مرات. على كل الاحوال هذا ينطبق على افلام الماس السميكة المطعمة بالبرون بكثافة (10^{20} cm^{-3}) والمحضرة بحيث تكون قوية ميكانيكيا لفصلها عن الارضية وهذا امرا ليس بالسهل.

نمو افلام سميكة في الحقيقة يتطلب ايجاد شروط عملية قادرة على الوصول إلى معدل نمو مرتفع، وماس بدرجة نقاء عالية ومورفولوجي جيد. هذه الشروط يجب ان تتضمن MWPD عالية. على كل الاحوال عند طاقة اعلى من 80 W cm^{-3} ، لاحظنا نقصان شديد في كفاءة التطعيم، حتى قيم منخفضة تصل إلى 0.01، مما يجعل مشاركة البرون محدودة لبضعة 10^{19} cm^{-3} .



كنتيجة لذلك ولكن نعدل الانخفاض في DE فان تركيز **diborane** (مركب من البورن والهيدروجين) عالي يجب ان يستخدم. ولسوء الحظ هذا يرفع تكون السخام soot والترسيب لا يمكن الحفاظ عليه ثابتا لمدة طويلة. مقارنة بين جودة الماس، فان معدل النمو وتكون السخام في طور الغاز ادى بنا الى استخدام MWPD متوسطة عند 60 W cm^{-3} . حيث اول رقائق ماس قائمة بذاته تم تكوينها بنجاح.

تقنية تصنيع ديودات الشوكتي والبيسيديو الرأسية تم التحقق منها وبينت خصائص I-V مشجعة (كثافة تيار بين 1000 و 2000 A cm^{-2} ، ونسبة تقويم 10^{10} ومجال قطع كهربى يزيد عن 1.3 MV cm^{-1} . هذه التقنية الان عملية والخطوة التالية هو تطوير تراكيب رأسية تبدأ من توليف افلام ماس سميكة قائمة بذاتها مطعمة بالبورن بدرجة عالية.

تمت الترجمة في المركز العلمي للترجمة

www.trgma.com

27-4-2011