

НАЙ-ВАЖНИ ПОСТИЖЕНИЯ

на

професор дфн Савчо Стефанов Тинчев

Институт по Електроника при БАН

I. СЪЗДАВАНЕ НА СЛАБИ СВРЪХПРОВОДЯЩИ (ДЖОЗЕФСОНОВИ) КОНТАКТИ И СВРЪХПРОВОДЯЩИ КВАНТОВИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИ (SQUID) ЧРЕЗ МОДИФИКАЦИЯ С УСКОРЕНИ ЕЛЕКТРОНИ ИЛИ КИСЛОРОДНИ ЙОНИ

Откриването на високотемпературната свръхпроводимост през 1986 год. породило големи очаквания за мащабни приложения в енергетиката, електрониката, медицината и много други области на науката и техниката. За електрониката особено важно бе създаването на слаби свръхпроводящи (Джозефсонови) контакти от тези нови материали, тъй като те са активните елементи (аналог на диодите и транзисторите в полупроводниковата електроника). Поради особеностите на високотемпературните свръхпроводящи материали, малка дължина на кохерентност и лоши интерфейсни свойства не бе и все още не е възможно създаването на Джозефсонови контакти от тунелен тип, подобни на Nb-AlO_x-Nb каквито се използват успешно в нискотемпературната свръхпроводникова електроника. По тази причина най-често Джозефсоновите контакти от високотемпературни свръхпроводящи материали бяха от типовете “бикристални” или “на стъпало”, които използваха свойствата на естествено възникналата слаба връзка между границите на зърната при израстването на високотемпературен свръхпроводящ слой върху бикристална подложка или подложка със стъпало. Очевидно е, че тези Джозефсонови контакти имат редица недостатъци, най-главния от които са неконтролируемост на техните параметри при тези в значителна степен случайни процеси при тяхното изготвяне. Много съществен недостатък е невъзможността за изготвянето на голям брой елементи върху една подложка и особено разполагането им на произволно място на подложката. По тази причина изключително актуално бе намирането на нов тип високотемпературни слаби (Джозефсонови) контакти, които да нямат тези недостатъци и което е много важно, да се изготвят само с методите и технологиите на съвременната микроелектроника.

През 1989 – 1990 год. по време на работата ми като Хумболтов стипендиант в Изследователския център Юлих, Германия предложих и реализирах за пръв път експериментално Джозефсонови контакти и свръхпроводящи квантови

интерферометри (SQUID) от YBaCuO тънки слоеве с помощта на модификация на много тесен участък (нанометри) от свръхпроводящия слой чрез ускорени електрони или йони на кислород [37]. Тези свръхпроводникови електронни елементи използваха само стандартни методи на микроелектрониката – електронна литография и йонна имплантация и работеха при температура на течния азот 77К, което е особено важно за тяхното практическо използване.

Модификацията с ускорени електрони се извършваше особено просто с помощта на сканиращ електронен микроскоп. Тази идея и технология бе използвана по-късно и изследвана най-подробно от ред изследователски групи в най-реномирани научни центрове в света сред които: Университета в Кембридж, Англия, Университета на Висконсин, САЩ, Университета Стони Брук, САЩ, Университета в Неапол, Италия, Тохоку университет в Япония и други. Изготвените елементи имаха идеални Джозефсонови свойства и с тях бяха реализирани сложни системи с единични кванти магнитен поток, използващи няколко десетки такива елементи.

Модификацията с ускорени електрони има обаче два недостатъка: отгряването на създадените дефекти при стайна температура и дългото време за изготвянето им поради последователния характер на процеса на облъчването. Тези недостатъци бяха осъзнати веднага и още в същата пионерска статия [37] предложих и представих резултатите от метод използващ имплантация с кислородни йони през тесен процеп в маска изготвена с електронна литография. По-късно изследвах подробно свойствата и характеристиките на Джозефсоновите контакти и едноконтатни SQUID изготвени с този метод [44, 48, 52, 55]. В частност за пръв път [50] бе измерена фундаменталната зависимост ток – фаза на Джозефсонов контакт от високотемпературен свръхпроводник. Използуваната конфигурация едноконтатен SQUID в безхистерезисен режим бе приложена по-късно успешно от други групи и при други Джозефсонови контакти, където бе регистрирано отклонение от идеалната синусоидална зависимост. Високотемпературни Джозефсонови контакти със широкоплощна йонна имплантация се изготвят, изследват и продължават да се усъвършенствуват в редица водещи лаборатории в света – Университета в Йена и RWTH в Аахен,

Германия , Университета в Кембридж, Англия , Университетите в Сан Диего и Ла Жолоа, САЩ, CNRS Франция и др.

С използването на тънкослойните YBCO SQUID, изготвени с кислородна йонна модификация бяха разработени и изпитани редица измервателни системи, най вече за геофизични измервания. Те включват сканиращ SQUID-магнетометър, 3-координатен магнетометър и спинер магнетометър [43, 45, 47, 51]. В сканиращия магнетометър бе достигнато рекордно за времето си пространствено разрешение по-малко от 1 мм, което позволи получаването на уникални резултати, например при измерване на магнитното поле генерирано от корозионни процеси и при измерването на остатъчната намагнитеност на образци от програмата по дълбоко сондиране – КТВ в Германия .

Нашите SQUID, изготвени с кислородна йонна модификация бяха първото електронно устройство на основа на високотемпературни свръхпроводящи материали летяло в космоса [54]. Немският институт за космични изследвания (Deutsche Forschungsanstalt fuer Luft und Raumfahrt - DLR) в Брауншвайг подготви експеримент за изследване на повърхностни ефекти при космически условия. Тази програма, известна като SESAM включваше 20 образци, които трябваше да бъдат подложени на топлинни, вакуумни и радиационни условия, типични при космически полет. Целта беше да се провери дали са достатъчно устойчиви, за да издържат на работа в космоса. Експериментът SESAM бе проведен на борда на немския спътник ASROSPAS, където нямаше криогенни условия, заради което се отказахме от работата на борда. Въпреки тези ограничения, експериментите бяха от особен интерес за нашите SQUID, където тяхната финна структура (до 300 nm) би могла лесно да се повреди от топлинните, вакуумни и радиационни условия на открития космос. Изследваният образец бе чип с 16 ВЧ SQUID изготвени на 10 mm x 10 mm подложка от SrTiO₃. Спътникът ASTROSPAS бе изведен в орбита от космическата совалка “Дискавъри”, полет STS-51 на 12.9.1993 год. В момента на старта образца беше на възраст 19 месеца. По време на десетдневния полет SQUID -чипа направи 155 обиколки на Земята на 300 км височина, като бе изложен на условията на открития космос. Характеристиките на SQUID бяха измерени още

веднъж след завръщането им на Земята през ноември 1993 година. Не бяха забелязани изменения в работата им след този десетдневен полет.

По-късно бе предложен метод за подобряване на слабите свръхпроводящи контакти, изготвени с йонна модификация чрез използване на йони с две различни енергии или йони от различен вид, при което се създава свръхпроводящ канал във вътрешността на слоя [58]. Този метод е защитен с български и немски патенти.

Тези работи са добре известни на научната общественост у нас и в чужбина и се цитират многократно в научната литература като пионерски работи в тази област. Прилагам копия от две такива статии (цитати № 80 и №193) доказващи приоритета ми. За разработване на технологията за изготвяне на SQUID от високотемпературни свръхпроводящи материали с помощта на електронно-лъчева литография и йонна имплантация са получени отличия: Грамота от ФИТ (ФРГ) и Академичната награда на БАН в областта на физическите науки за 1996 год.

II. ИЗСЛЕДВАНЕ НА СИГНАЛНИТЕ И ШУМОВИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СВРЪХПРОВОДЯЩИ КВАНТОВИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИ (SQUID)

Разработен е метод за анализ на едноконтактен свръхпроводящ квантов интерферометър (ВЧ SQUID) в хистерезисен режим [3]. В нулево приближение на този метод е предложен нов модел - модел на успоредника. Показано е, че първото приближение е достатъчно за описание на всички сигнални характеристики на сквида. Методът е използван за изследване на SQUID с традиционна високочестотна схема при произволна разстройка и номер на платото. В частност са намерени условията за съществуване на триъгълна сигнална характеристика. Основните резултати от анализа са потвърдени експериментално при изследване на SQUID с точков контакт, работещ на честота ~ 10 MHz.

Теоретично и експериментално е изследван въпроса за фазовата и амплитудна демодулация в едноконтактния свръхпроводящ квантов интерферометър (ВЧ SQUID) [5]. Показано е, че при големи стойности на параметъра k^2Q схемата с фазова демодулация дава възможност за получаване на

по-голяма чувствителност поради по-голямата стръмност на сигналната характеристика. В случай обаче, че е възможно коефициента на връзка между интерферометъра и трептящия кръг да бъде оптимизиран, фазовата демодулация не дава предимства пред обикновенното амплитудно детектиране.

Изследвани са модифицирани схеми на високочестотен SQUID - с отделна бобина за напмпване [2] и баласна схема [5]. Анализът на тези по-сложни схеми показва, че даже при оптимална демодулация, амплитудата на сигналната характеристика не превишава достиганата в обикновенната схема на SQUID.

Изготвени са тънкослойни SQUID, използващи структури с непосредствена проводимост от S-N-S тип, където нормалния метал е бисмут [4]. С помощта на разработена методика за измерване на параметрите на слабия свръхпроводящ контакт във ВЧ SQUID са измерени критичния ток и нормалното съпротивление на тези слаби свръхпроводящи контакти.

Пресметнат е входния импеданс на високочестотен SQUID в най-често използвания хистерезисен режим на работа [7-8]. Получени са зависимостите на входната индуктивност и входното му съпротивление от параметрите на SQUID, сигналната честота и разстройката между честотата на напмпване и резонансната честота на трептящия кръг. Показано е, че входната индуктивност на SQUID е винаги положителна, докато входното съпротивление може да бъде положително, отрицателно или нула в зависимост от съотношението на сигналната честота и разстройката. Експериментално [13] е измерена зависимостта на входното съпротивление от разстройката, която е в добро съвпадение с теорията.

Разработен и е изследван напълно завършен прибор ВЧ SQUID, състоящ се от блок високочестотна електроника, блок нискочестотна електроника и 4,2 К криогенна част [9]. Получена е чувствителност на целия прибор $3 \cdot 10^{-4} \Phi_0 \text{Hz}^{-1/2}$, на нивото на чувствителността на аналогични прибори, разработени в други лаборатории в света. По-късно е създаден нов подобрен вариант използващ по-висока честота на модулация (50 КHz вместо 1 КHz). Въведено е автоматично нулиране при превишаване на динамичния диапазон на входния сигнал, както и някои други подобрения, улесняващи работата с прибора от неспециалист.

Изследван е теоретично режима на работа на едноконтактния SQUID, когато честотата на напомпване е сравнима с характерната честота на интерферометъра [11,16]. Входният импеданс на сквида е пресметнат за различни стойности на параметъра $q = \omega L/R$, сигналната честота и разстройката. Показано е, че както входното съпротивление, така и входната индуктивност могат да бъдат положителни или отрицателни.

Изследвани са неадиабатичните явления в свръхпроводящ интерферометър при условие, когато честотата на напомпване е сравнима с характерната честота на интерферометъра. С помощта на предложения модел на неадиабатичните процеси при $l \gg 1$ и $q \sim 1$ са пресметнати амплитудно-честотните характеристики /АЧХ/ на сквида. Показано е, че вследствие на инерционността и възникването на косинусна компонента на потока, появяването даже на първото плато е свързано с изместване на централната честота на АЧХ в посока на високите честоти. Експериментално наблюдаваните АЧХ потвърждават основните изводи.

Изследван е нискочестотния шум от типа $1/f$ в тънкослойни устройства като болометри, джозефсонови контакти и SQUID [12]. С помощта на модел основан на спонтанните температурни флуктуации и топлообмена с околната среда е пресметната спектралната плътност на $1/f$ шума. Резултатите от пресмятията са в добро съгласие с експерименталните данни.

Предложен е възможен механизъм допринасящ за наблюдавания $1/f$ шум в SQUID, който се основава на топлинния шум във всеки добър проводник, намиращ се в близост до сквида. Експериментално е изследвано влиянието на свръхпроводящия екран върху нискочестотния шум на SQUID [20].

Проведен е анализ на динамичните (сигнални) свойства на едноконтактния безхистерезисен SQUID [14]. Получени са коефициентите на преобразуване по амплитуда и фаза, както и входните параметри на SQUID. Направен е извода, че за получаване на максимален коефициент на преобразуване е нужно да се използват максимално възможни стойности на параметъра $k^2 Q I$. Показано е, че е възможно изменение на входния импеданс в най-широки граници (а също и знака му). Интересен резултат се оказва възможността за получаване на реалната част на входния импеданс равна на нула в най-широк диапазон на изменение на честотата

на сигнала, ако се работи при нулева разстройка. Показано е, че тогава е необходимо да се използва фазова демодулация.

Анализирана е възможността за използване на едноконтактния безхистерезисен SQUID за високочестотни измервания - измерване на ВЧ ток, ВЧ мощност и затихване [17]. Оценена е горната граница на честотата на сигнала при работа под първата нула на Беселовата функция. По-късно анализа е обобщен за произволна амплитуда на сигнала. Пресметнати са дълбочината на модулация на синфазната и квадратурната компоненти. Получено е условието, което трябва да се изпълнява, за да може безхистерезисния SQUID да се използва за високочестотни измервания.

Пресметнат е шум на релаксационен постоянен ток SQUID внесен от релаксационната R , L верига [21]. Показано е, че този шум не ограничава съществено разрешението на SQUID.

Наблюдавана е квантова интерференция в масивни образци от $YBaCuO$ и $BiSrCaCuO$, което е предпоставка за създаване на SQUID, работещи при азотни температури [24]. Създадени и изследвани са свръхпроводящи квантови интерферометри (SQUID) от масивни високотемпературни свръхпроводящи материали [33, 34]. Обяснени са наблюдаваните особености на сигналните им характеристики с възникването на SQUID вътре в моста или с различни многоквантови преходи. Демонстрирана е възможността за използването на такива сквидове в реални магнитни измервания [35]. В 77K- SQUID изготвен от масивен керамичен $YBaCuO$ материал е измерен много нисък $1/f$ шум при честоти само под около 5 Hz [33]. Изследвана е природата на този нискочестотен шум чрез измерване корелацията на шума на два SQUID и е установено, че наблюдавания шум е от типа “магнитен шум” и произлиза вероятно от локални флуктуации на магнитния поток в тялото на SQUID [36].

Предложено е възможно обяснение на наблюдаваното високочестотно редуциране на нискочестотния шум в постоянен ток SQUID чрез неговото параметрично преобразуване нагоре и дисипацията му в нормалното съпротивление на SQUID [60].

III. НАНАСЯНЕ НА ТЪНКИ СЛОЕВЕ ОТ ДИАМАНТОПОДОБЕН ВЪГЛЕРОД С ПЛАЗМЕНО-АСИСТИРАНО CVD И ИЗПОЛЗУВАНЕТО ИМ В СЛЪНЧЕВИ АБСОРБЕРИ

Слънчевите термични колектори събират и преобразуват слънчевата енергия в топлинна енергия. Един от най-важните елементи на слънчевия термичен колектор е слънчевия абсорбер. За да бъде ефективен абсорберът трябва да бъде спектрално селективен, т.е. да има максимално поглъщане в областта на максималната слънчева радиация и в същото време минимално термично излъчване. За целите на слънчевите термични колектори най-съществена е слънчевата радиация в областта $0.3\div 2.5\mu\text{m}$ включваща ултравиолетовия, видимия и близкия инфрачервен диапазон.

В същото време излъчваната термична радиация е в обхвата между $2\mu\text{m}$ и $50\mu\text{m}$, като за температура на абсорбера 100°C максимума е при около $8\mu\text{m}$. Тези две области почти не се припокриват, което прави възможно по принцип създаването на ефективни спектрално-селективни слънчеви термични абсорбери.

Спектралните селективни абсорбери се изследват интензивно от 50-те години на XX век. Броят на публикациите в литературата в областта на селективните абсорбери е много голям. Описаните системи включват хомогенни слоеве с подходяща собствена абсорбция, двуслойни покрития полупроводник/метал, многослойни покрития, метал-керамични и др.

Най-прости са хомогенните еднослойни покрития, но за съжаление няма материали с необходимите свойства. Ето защо се използват по-сложни системи – двуслойни и многослойни. Тези абсорбери се състоят от два (или повече) слоеве с различни оптични свойства (абсорбер-рефлекторни тандеми). При тях диелектричен или полупроводников слой с голяма абсорбция за слънчевата радиация е нанесен върху неселективна, но високо отразяваща метална повърхност. Това са най-често използваните селективни слънчеви абсорбери.

Друг тип селективни абсорбери са т.н. кермет (керамик-метал) покрития. При тях малки метални частици са диспергирани в диелектрична матрица. Променяйки

размера и концентрацията на метални частици е възможно изменение на свойствата на тези материали в широки граници и постигането на оптимални свойства.

Използваните методи за нанасяне на селективни абсорбери включват всички възможни технологии – от селективни бои до вакуумни методи. Най-добрите от тях използват магнетронно разпръскване на CrN - Cr_xO_y , Ni-NiO , TiN_xO_y или AlN с плавно изменение на оптичните свойства от подложката до антиотражателното покритие. Достигат се стойности за абсорбция $\alpha = 0.9 \div 0.97$ и за термично излъчване $\epsilon = 0.03 \div 0.1$. На повърхността се нанася антиотражателно покритие с коефициент на пречупване между този на въздуха ($n = 1$) и на лежащия отдолу селективен абсорбер ($n \approx 2.3$).

Много перспективни се очертават селективните абсорбери на основа на аморфен въглерод/метал (а-С:Н/Ме). При тях диелектричната матрица се състои от диамантоподобен, аморфен въглерод (а-С:Н), в която са вградени метални наночастици. От гледна точка на дълговременната стабилност на тези абсорбери най-удачни се оказват преходните метали образуващи карбиди, като за сега най-добри свойства показва системата с хром а-С:Н/Cr. Такъв абсорбер има градиентен състав с различно съдържание на метал по дълбочина. Слойт непосредствено до металната подложка е с голямо съдържание на хром за получаване на добра адхезия и да служи като дифузионна бариера. Средният слой е по същество абсорбиращ елемент с оптичен коефициент на пречупване между този на първия слой и завършващия слой. Последният слой е антиотражателно покритие и защитен (пасивиращ) с най-малко съдържание на метали.

За нанасяне на такива а-С:Н/Cr селективни абсорбери са разработени плазмени методи на основа на PE CVD процеси (плазмено-стимулирано химично газово отлагане). При този процес смес от подходящ въглеводород и благороден газ (напр. аргон) се активира, йонизира и дисоциира в плазма. Тогава на подложката се извършва химично газово отлагане (CVD). Едновременно с това от монтиран във вакуумната камера магнетрон се разпръсква метал (хром) от подходяща мишена, като по време на нанасянето се променя обикновено мощността на магнетрона с цел получаване на различен състав. Получените по този начин селективни

абсорбери имат много добри параметри, но технологичният процес е сложен и трудно контролируем.

В нашата работа [71] бе предложен и реализиран нов тип абсорбер за слънчеви елементи на основата на аморфен въглерод. При него бе използвана възможността за промяна на забранената зона, а с това и на оптичните свойства на този материал без допълнително легиране с метални наночастици. Това се постига само чрез промяна на напрежението на разряда.

Оптичното пропускане за DLC слоеве нанесени при различни напрежения е различно и целия слънчев спектър може да се покрие чрез промяна на напрежението между 500 V и 2,5 kV. При това бе установено, че коефициента на пречупване се променя слабо, което дава възможност за създаване на многослойна система от такива слоеве.

Бе изготвен такъв абсорбер състоящ се от 5 подслоя нанесени при различни напрежения от 0,5; 1; 1,5; 2; и 2,5 kV. Отделните подслоеве бяха с различни забранени зони от 2,1; 1,9; 1,7; 1,4 и 1,2 eV, респективно. Измерена бе абсорбцията на тази многослойна система, където е сравнена със спектъра на слънчевата радиация. По този начин бе показано, че е възможно създаването на абсорбер с характеристики съгласувани със слънчевия спектър само с промяна на напрежението на разряда.

На основа на тези работи бе изпълнен проект ННП-Е-04-01“а-С:Н селективни абсорбери за термични колектори” от Националната научна програма енергетика.

IV. ГЕНЕРАЦИЯ НА ХАРМОНИЧНИ С ВИСОК НОМЕР В НЕХОМОГЕННИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИ СВРЪХПРОВОДЯЩИ СЛОЕВЕ

Генерацията на хармонични в различни материали и прибори под въздействието на синусоидално поле е явление представляващо незатихващ интерес. Когато силно електромагнитно поле взаимодейства с веществото то предизвиква кохерентно излъчване с честоти, кратни на въздействащата честота. Обикновено нелинейността на материалите (или устройствата) е малка и затова се

наблюдват само хармонични от нисък ред. Съществуват обаче процеси, като генерацията на високи оптични хармонични например, където се наблюдават хармонични от много висок ред – по-висок от 100. Нелинейният отклик на високотемпературните свръхпроводници е един такъв процес.

В няколко работи [70, 75-77] са представени резултати от изследванията на генерацията на хармонични от висок ред в YBCO слоеве при въздействие на променливо магнитно поле. Генерацията на високи хармонични от нехомогенно йонно-имплантирани YBCO слоеве е изследвана чрез наблюдение на техния отклик на променливо магнитно поле. Тези хармонични се генерират вследствие на високата нелинейност, причинена от внезапното проникване на магнитен поток над първото критично поле. Установено е че, докато в хомогенни слоеве амплитудите на хармоничните намаляват монотонно с увеличаване на техния номер, в нехомогенни слоеве са наблюдавани хармонични от ред над 100, както и интерференционни ефекти. Създаден е теоретичен модел, който обяснява експерименталните резултати и е предложен нов метод за определяне на хомогенността на свръхпроводящи слоеве.

Работата бе финансирана от НСНИ чрез договор Ф-1304.

V. МОДИФИКАЦИЯ НА СЛОЕВЕ ОТ ДИАМАНТОПОДОБЕН ВЪГЛЕРОД В ГРАФЕН С НИСКОЕНЕРГЕТИЧНИ ЙОНИ

Най-успешната технология за изготвяне на графен засега е отлагането от химични пари - (CVD) методи, като слоя се отлага върху метален слой (Ni, Co) или Si. За електрониката обикновено са необходими графенови слоеве върху изолиращи подложки. Затова графеновите тънки слоеве, отложени върху метали, се прехвърлят върху изолиращи подложки, което не е технологично. Освен това, свойствата на прехвърления графен се влошават от големия брой уловки и фононното разсейване при типичните използвани подложки като SiO₂.

За първи път [92, 93] ние предложихме изготвяне на графен чрез модификация на слоеве от диамантоподобен въглерод с нискоенергетични йони. В нашите първи успешни експерименти беше използвана бомбардировка с аргонни

йонни с ниска енергия в импулсен магнетрон. При такава ниска енергия на процеса и съответно температура, повърхността на аморфния въглерод може да кристализира до графен в резултат от създаването на точкови дефекти и засилена дифузия, причинени от йонната бомбардировка.

Бяха измервани Рамановите спектри на пробите от диамантоподобен въглерод и модифицирани с нискоенергетични аргонни йони, които показват частична кристализация и са типични за спектрите на дефектен графен – разделени D- и G-пикове и широк 2D-пик. Тъй като интерпретацията на Рамановите спектри на такава сложна система не е просто ние пресметнахме [96, 97] Рамановия сигнал на графен върху аморфен хидрогенизиран въглерод на Si подложка. Нашите резултати показват, че многократни отражения и интерференционни ефекти водят до усилване на Рамановия сигнал на системата. Характерните за графен G и 2D пикове достигат максимум за дебелини на аморфния въглероден слой от 75 nm и 230 nm. Повишаването на сигнала на 2D пика обаче е много слабо за разлика от този на сигнала на G пика. Затова експериментално измерения Раманов спектър на цялата система се състои от усилен, но слаб 2D-пик и по-силни D и G пикове, доминирани от G и D пиковете на a-C:H. Измереният електрически полеви ефект [97, 98] показва амбиполярна зависимост, характерна за монослоен графен с остър амбиполярен пик близо до нулево напрежение на гейта с повърхностно съпротивление от 7.5 k Ω /sq. Тази стойност е от същия порядък като съпротивлението на монослоен графен. Поради това бе направен извода, че съществува естествен графен на повърхността на слоевете от аморфен въглерод. Тези резултати могат да открият нови перспективи не само за приложенията на графена, но също така и за по-добро разбиране на този уникален материал.

На основата на тези слоеве бе изготвен и изследен полеви транзистор, който показва характеристики типични за графенов транзистор [99]. Тъй като слоевете от аморфен въглерод могат да бъдат лесно израстнати с неограничени размери и не е необходимо прехвърляне на графена, това може да открие нови възможности за графеновата електроника.