

УДК 621.383

Плазмохимическое осаждение пленок оксинитрида кремния для пассивации поверхности КРТ

В. В. Васильев, Ф. Н. Дульцев, Ю. П. Машуков, И. О. Парм, А. П. Соловьев
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Использование реактора с планарно-индукционным источником плазмы позволило минимизировать радиационные воздействия на поверхность полупроводниковой подложки. Определены технологические режимы осаждения слоев оксинитрида кремния высокого качества при комнатной температуре для пассивации поверхности образцов р-типа $Hg_{0,78}Cd_{0,22}Te$.

Плазма высокочастотных газовых разрядов широко используется при осаждении тонких пленок для целей микроэлектроники. В настоящее время наметился переход к процессам с использованием источников плазмы высокой плотности. Термин "источник плазмы высокой плотности" включает в себя все источники с плотностью ионов выше 10^{11} см⁻³. Источники плазмы высокой плотности обеспечивают отношение ион—нейтральная частица на уровне процентов и плазменный потенциал порядка десятков вольт [1]. Ионные потоки высокой плотности приносят на поверхность образца дополнительную энергию, что позволяет осаждать слои с более высокой плотностью и с совершенством структуры при заданной температуре синтеза.

Планарно-индукционный источник плазмы — это источник плазмы высокой плотности, позволяющий уменьшить размеры реактора и как следствие потребляемую высокочастотную (ВЧ) мощность при обработке плоских образцов. Зона разряда обычно представляет собой цилиндрический объем, диаметр которого много больше его длины. Форма разряда в сечении может быть выбрана любой другой в зависимости от конкретных приложений. Индукционную катушку в целях уменьшения загрязнения металлами полупроводниковых структур располагают вне вакуумного объема, она отделена от плазмы диэлектрическим окном. Тем не менее возможно размещение индукционной катушки и в зоне разряда. Диэлектрическое окно обычно изготавливают из кварца или сапфира. Образец помещают на расстоянии 5—10 см от окна. Индуцированное электрическое поле обладает только азимутальной составляющей и в случае идеального индукционного разряда не имеет ускоряющей к образцу ВЧ-составляющей потенциала в зоне приэлектродного падения потенциала. В реальных системах возможна паразитная емкостная связь между индуктором и плазмой, которая может привести к возникновению осевой составляющей наведенного ВЧ-потенциала в зоне расположения образца. Для устранения емкостной связи используют специальные щелевые электростатические экраны, позволяющие проникать за экран только ВЧ-полю с вектором электрического поля, перпендикулярным направлению щелей [2]. В работах [3, 4] показано, что планарно-индукционные источники плазмы при определенных условиях характеризуются однородным и почти моно-

энергетическим распределением ионов, бомбардирующих заземленный образец. С использованием электростатического экрана распределение по энергиям ионов аргона становится моноэнергетическим, уменьшаясь с 16 до 7 эВ в диапазоне давлений 2,25—225 мТорр при мощности разряда 200 Вт [4].

В настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал по модификации приповерхностных свойств твердых растворов теллуридов кадмия-ртути $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ), вплоть до конверсии дырочного типа проводимости при ионном воздействии. При этом речь идет об энергиях ионов порядка 100 эВ и выше [5]. В качестве механизма конверсии предлагаются радиационные повреждения приповерхностной области, образование и диффузия междоузельной ртути в объем полупроводника. Указанные процессы приводят к образованию донорных центров и компенсации акцепторов в объеме КРТ. Энергии ионов, воздействующие на поверхность КРТ в планарно-индукционном реакторе, достаточно малы, вследствие чего не оказывают существенного влияния на свойства КРТ.

Схема планарно-индукционного реактора для осаждения диэлектрических слоев на КРТ показана на рис. 1. Зона разряда имеет диаметр 20 см и высоту, равную 6 см. ВЧ-поле индуцируется в зоне разряда посредством спирального индуктора через кварцевое окно. Для уменьшения емкостной связи индуктора с плазменным разрядом использовался щелевой электростатический экран.

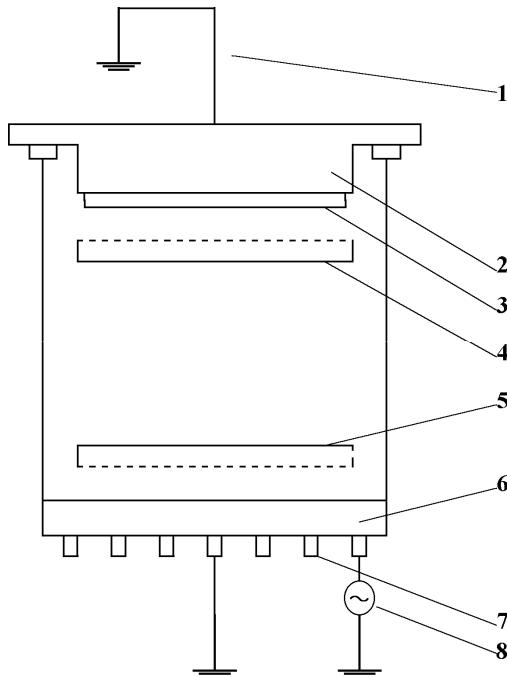


Рис. 1. Схема планарно-индукционного реактора:

1 — заземление подложкодержателя; 2 — подложкодержатель; 3 — подложка; 4 — ввод 5%-ной смеси моносилана с аргоном; 5 — ввод аммиака и закиси азота; 6 — кварцевое окно; 7 — спиральный индуктор; 8 — ВЧ-генератор

С учетом особенностей конструкции реактора и в результате оптимизации был выбран технологический режим синтеза слоев оксинитрида кремния на образцах КРТ. Мощность, вводимая в разряд от ВЧ-генератора частотой 13,56 МГц, составляла 120 Вт. Реактор откачивался диффузионным насосом до давления 10^{-5} Торр. В качестве исходных реагентов использовали 5%-ную смесь моносилана с аргоном, аммиак, закись азота. Указанные газы-реагенты подавались в соотношении 40:7:2,5. Соотношение газов было выбрано в целях получения минимальных механических напряжений в системе пленка—подложка. В процессе напуска газов поддерживалось рабочее давление 80 мТорр, температура синтеза составляла 25 °С.

Спектры пропускания пленок были записаны на спектрометре Bruker IFS-113V с Фурье-преобразованием в диапазоне $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ с разрешением 1 см^{-1} . На рис. 2 показаны ИК-спектры синтезированных пленок. Согласно литературным данным [6—8], широкая полоса в диапазоне $700\text{--}1060\text{ см}^{-1}$ содержит вклады от следующих колебаний: основной пик (890 см^{-1}) — это сдвиговое колебание Si—N-связи, пик на частоте 820 см^{-1} — это вклад от валентных колебаний Si—NH₂—SiN, колебания на частоте 1100 см^{-1}

в данном случае обусловлены наличием как Si—O—Si-связей в пленках [8], так и Si₂N—H-связей, небольшой пик около 1550 см^{-1} говорит о наличии SiN—H₂-связей. Наблюдаемое уширение в области $1140\text{--}1240\text{ см}^{-1}$ может также свидетельствовать о наличии в пленках N—H-связей. Кроме того, о наличии водорода в пленках говорят пики на 2176 см^{-1} (валентные колебания N₂Si—H) и 3355 см^{-1} (валентные Si₂N—H). В области

$800\text{--}900\text{ см}^{-1}$ могут наблюдаться колебания разных связей, включая и полисилоксановые. Содержание водорода, рассчитанное из данного спектра, составляет 10 об. %.

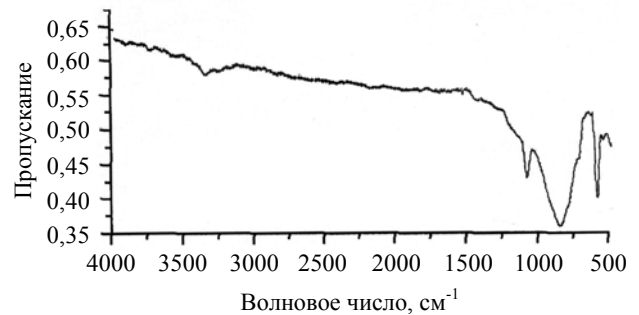


Рис. 2. ИК-спектр оксинитрида кремния

Исследование химического состава осажденных слоев также проводилось методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на анализаторе MAC-2 фирмы RIBER (Франция). Для возбуждения спектров использовался магниевый источник с энергией линии Mg — Kα, равной 1253,6 эВ, мощность источника 300 Вт, диаметр рентгеновского пучка около 5 мм, спектры получены при разрешении анализатора $\Delta E = \text{const} = 0,5\text{ эВ}$.

Для снятия верхнего слоя проводилось ионное распыление ионами Ag⁺ с энергией 3 кэВ при угле падения 24° к плоскости образца и токе пучка 100 нА. Сканирование ионным пучком выполнялось по всей анализируемой поверхности образцов. Время распыления образцов составило 300 мин, оценочная толщина распыленного слоя образцов составляет ~5 нм. В качестве точки отсчета для определения энергий связи были использованы Оже-линии Si KLL, возбуждаемые тормозным излучением магниевого катода и имеющие кинетическую энергию 1600 эВ. На образце наблюдались пики основных элементов (Si, N, O) и углерода. Данные математической обработки экспериментальных результатов, полученные методом РФЭС, для образцов, очищенных на глубину около 5 нм, представлены ниже.

Относительная концентрация элементов на очищенной ионной бомбардировкой поверхности образца

Образец	O	N	C	Si
Si _x N _y O _z	0,10	0,44	0,04	0,42

Для изучения жесткости каркаса получаемых слоев использован метод адсорбционной эллипсометрической порометрии с применением высоковакуумной эллипсометрической установки. Методика получения изотерм адсорбции-десорбции подробно описана в работах [9, 10]. Быстродействующий автоматический эллипсометр ЛЭФ-701 имел рабочую длину волны $\lambda = 632,8\text{ нм}$, угол падения луча на образец составлял $\varphi_0 = 70^\circ$. Многоугловые измерения (пять углов) проводили на эллипсометре ЛЭФ-3А. Капиллярные силы, возникающие в порах при адсорбции, в основном зависят от размера пор. Если известны средний радиус пор и их концентрация, то можно оценить давление в порах. Поведение пленки при адсорбции, если размер пор не сильно различается, будет зависеть от жесткости каркаса

са пленки. Наиболее жесткий и ненапряженный каркас у пленок получен при $R = 3$. Такие слои имеют пористость до 7 %, средний радиус пор 3 нм, показатель преломления 1,65.

Для выяснения влияния плазмы на поверхность КРТ, которое возникает на начальной стадии роста диэлектрической пленки, были изготовлены и исследованы структуры металл—диэлектрик—полупроводник (МДП). Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) и высокочастотная проводимость измерялись с помощью измерителя импеданса BM 507 фирмы TESLA. На рис. 3, а, б приведены экспериментальные и расчетные зависимости емкости C и приведенной проводимости G/ω от напряжения. При расчетах использовалось значение собственной концентрации, соответствующее составу $x = 0,22$, равное $1,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

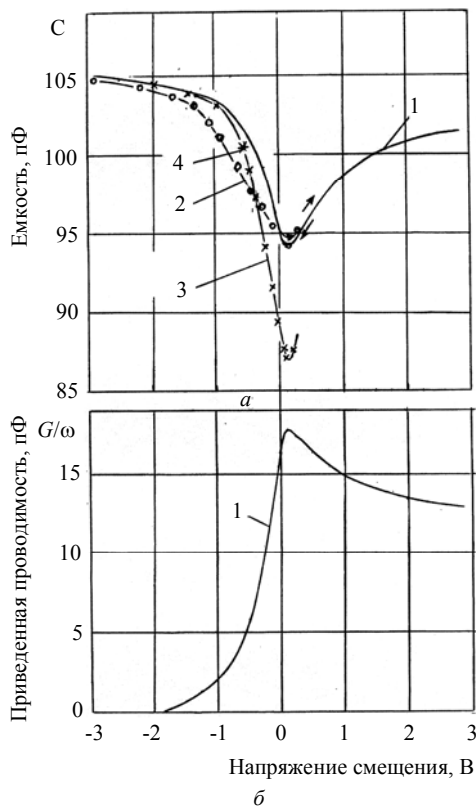


Рис. 3. Зависимости, измеренные при частоте тестирующего сигнала 500 кГц и температуре 77 К с площадью МДП структуры $2,5 \cdot 10^3 \text{ см}^2$: а — $C-V$; б — $G/\omega-V$; 1 — экспериментальная зависимость; 2 — зависимость, рассчитанная в предположении отсутствия быстрых поверхностных состояний; 3 — то же, в предпо-

ложении, что концентрация акцепторов равна холловской концентрации дырок $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 4 — точка плоских зон на кривой 3

Вольт-фарадная характеристика 2 построена в предположении, что отсутствуют быстрые поверхностные состояния. В этом предположении концентрация дырок, определенная по глубине модуляции ВФХ, оказалась равной $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что в 4 раза больше холловской концентрации. Кроме того, крутизна левой ветви ВФХ оказалась выше у экспериментальной кривой (должно быть наоборот). В расчетную кривую 3 заложена холловская концентрация дырок $p = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в этом случае более высокие значения емкости на экспериментальной кривой можно приписать вкладу в емкость структуры емкости быстрых поверхностных состояний. Оценка энергетической плотности этих состояний дает величину $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Значительное влияние быстрых поверхностных состояний на ВФХ подтверждает также тот факт, что существенная величина G/ω наблюдается не только в области сильной инверсии (правая часть ВФХ), но и в области обеднения. Эти данные говорят о том, что осаждение пленок оксинитрида кремния в реакторе с планарно-индукционным источником плазмы не изменило холловскую концентрацию дырок.

Литература

1. Forster J. C., Keller J. H. Planar inductive sources// High-density plasma sources. Edited by O. A. Popov. Noyes Publications, 1995. P. 76—99.
2. Wayne L. Johnson. Electrostatically-shielded inductively-coupled RF plasma sources// Ibid. P. 100—148.
3. Hopwood J.// Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. № 9. P. 940.
4. Kortshagen U., Zethoff M.// Plasma Sources Sci. Technol. 1995. V. 4. P. 541.
5. Мынбаев К. Д., Иванов-Омский В. И.// ФТП. 2003. Т. 37. № 10. С. 1153.
6. Aydinli A., Serpenguzel A., Vardar D.// Solid State Communication, 1996. V. 98. № 4. P. 273.
7. Sassi Z., Chafik K., Bureau J. C., Hajbi A. El// Applied Surface Science, 2002. V. 187. P. 3.
8. Lu Z., Santos-Filho P., Stevens G., Williams M. J., Lucovsky G.// Vac. Sci. Technol. A. 1995. V. 13. № 3. P. 607.
9. Dultsev F. N., Baklanov M. R.// EC&SS Letters, 1999. V. 4/2. P. 192.
10. Baklanov M. R., Mogil'nikov K. P., Polovinkin V. G., Dultsev F. N.// J. Vac. Sci. Technol. B. 2000. V. 18/3. P. 1385.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Low temperature silicon oxinitride film deposition using planar inductive plasma source for mercury-cadmium-telluride (MCT) passivation

V. V. Vasiljev, F. N. Dultsev, U. P. Mashukov, I. O. Parm, A. P. Solowjev
 Russian Academy of Sciences, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

In this paper, material properties of silicon oxynitride films deposited at low temperature in a planar inductive plasma reactor are presented. Choosing low-energy ion condition at grounded substrate, we are able to deposit the silicon oxynitride films without conductivity type conversion effect in p-type material $Hg_{1-x}Cd_xTe$ with $x = 0.22$.

УДК 621.315.592

Влияние легирования редкоземельными элементами на исходную и сенсibilизированную ИК-фоточувствительность слоистых кристаллов селенида индия

А. Ш. Абдинов, Г. Х. Эйвазова

Бакинский государственный университет, г. Баку, Республика Азербайджан

Р. Ф. Бабаева, Р. М. Рзаев

Азербайджанский государственный экономический университет, г. Баку,
Республика Азербайджан

Исследовано влияние легирования редкоземельными элементами (РЗЭ) типа Gd, Ho и Dy при $N_{REE} \approx 0—10^1$ ат. % на исходную, а также сенсibilизированную ИК-фоточувствительность в кристаллах слоистого полупроводника n-InSe. Показано, что зависимость исходной и сенсibilизированной ИК-фоточувствительностей от уровня легирования РЗЭ в изучаемых кристаллах InSe обусловлена зависимостью степени пространственной неоднородности кристалла, энергетической глубины залегания мелких уровней α -прилипания и г-центров медленной рекомбинации, а также плотности мелких уровней α -прилипания от N_{REE} .

Монокристаллы селенида индия (n-InSe) обладают высокой фоточувствительностью во всей видимой и в некоторой области ближней инфракрасной (ИК) части оптического спектра ($0,35 < \lambda \leq 1,30$ мкм) в широком интервале температуры (вплоть до ~ 450 К) [1]. Недавно появилась также информация о возможностях сенсibilизации ИК-фоточувствительности вплоть до 3,50 мкм различными внешними воздействиями (электрическим полем и собственным светом [2]) и управлением электронных свойств (3—7) путем легирования различными РЗЭ этого полупроводника. Однако влияние легирования РЗЭ на исходную и сенсibilизированную ИК-фоточувствительность этого материала не изучено, хотя полученные при этом результаты могут быть полезными как для физики слоистых полупроводников типа соединений A_3B_6 , так и для выявления новых возможностей их для применения в ИК-технике.

Данная работа посвящена исследованию влияния легирования РЗЭ типа гадолиния (Gd), гольмия (Ho) и диспрозия (Dy) при малом процентном содержании вводимой примеси ($N_{REE} \approx 0—10^1$ ат. %) на исходную и сенсibilизированную (электрическим полем и собственным светом) ИК-фоточувствительность в монокристаллах селенида индия.

Изучаемые образцы с поперечными и продольными токовыми контактами (когда ток через образец протекает в направлении перпендикулярно и вдоль естественных слоев, соответственно) скалывались из крупных слитков n-InSe<РЗЭ>, выращенных методами медленного охлаждения при постоянном градиенте температуры вдоль слитка и Бриджмена [8]. Исследовались образцы с $N_{REE} = 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}$ ат. % для каждого из вышеупомянутых РЗЭ (Gd, Ho и Dy). Токовые контакты получали путем припаивания металлического индия In, олова Sn или же нанесением специальной серебряной пасты на свежеослощенные поверхности образцов.

Измерения проводили в интервале температур 77—400 К при напряженности, приложенной к образцам электрического поля, от предельно слабой до $2,5 \cdot 10^3$ В/см.

Длина волны, интенсивность и длительность воздействия падающего на образец монохроматического света с достаточной точностью менялись в пределах 0,25—4,00 мкм, $0—10^2$ лк и от непрерывного до $\sim 0,1$ мс, соответственно.

Установлено, что при относительно низких температурах ($T \leq 200$ К) специально нелегированные кристаллы n-InSe, помимо высокой собственной положительной ($0,40 \leq \lambda \leq 1,25$ мкм) фоточувствительности, обладают также относительно слабой (по сравнению с собственной) отрицательной примесной фоточувствительностью.

Эксперимент