

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП СТРУКТУР НА ОСНОВЕ GaAs

Воронков В. П., Калыгина В. М., Муленков С. Ю., Оборина Е. И., Сальман Е. Г., Смирнова Т. П.

Исследовано влияние импульсного лазерного отжига с $\lambda = 0.69$ мкм на электрические характеристики структур металл— Si_3N_4 — BN — GaAs . Показано, что при энергиях отжига $E \leq 10$ Дж/см² вольт-фарадные и вольт-сименсные характеристики сдвигаются в область меньших обогащающих потенциалов. При $E > 10$ Дж/см² происходит инверсия хода вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик. Изменения электрических характеристик МДП структур после лазерного отжига связаны с превращениями, происходящими на границе раздела диэлектрик—полупроводник.

Создание границы раздела диэлектрик—полупроводник $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, отвечающей требованиям современной микроэлектроники, является сложной технологической проблемой. Вместе с тем представляется важным разработка методов воздействия на уже сформированные гетерограницы с целью модификации их свойств в нужном направлении. Одним из эффективных способов изменения характеристик тонкопленочных МДП структур на основе сложных полупроводников с широкой запрещенной зоной может быть лучевое воздействие [¹⁻⁵].

В данной работе представлены результаты исследования влияния импульсного лазерного отжига (ЛО) на электрические характеристики МДП структур Al — Si_3N_4 — BN — GaAs . Работа проводилась с целью выявления возможности управления свойствами границы раздела диэлектрик—арсенид галлия. Пленки нитрида бора и нитрида кремния наносились в высокочастотной плазме при температуре подложки $T = 200$ и 400 °С соответственно. Толщины диэлектрических слоев составляли 500 для BN и 500 Å для Si_3N_4 . В качестве подложек использовались пластины электронного арсенида галлия с $n = 2.0 \cdot 10^{15}$ см⁻³, ориентированные по плоскости (100), и пластины (m) GaAs с $n = 2.4 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Полевой электрод с фиксированной площадью S создавали напылением алюминия после лазерной обработки структуры. Длина волны лазерного излучения (ЛИ) $\lambda = 0.69$ мкм выбрана из условия прозрачности диэлектрика и поверхностного поглощения в арсениде галлия, что позволяло обрабатывать непосредственно границу раздела диэлектрик—полупроводник. Плотность энергии в импульсе варьировалась в пределах $0 \div 20$ Дж/см² при длительности $\tau = 10^{-3}$ с. Облучение проводилось со стороны диэлектрической пленки.

Исследовались квазиравновесные вольт-фарадные ($C-U$) характеристики, зависимость активной проводимости от смещения ($G-U$) на частотах тестового сигнала $f = 10^3$ и 10^6 Гц, а также динамические вольт-амперные характеристики на частоте $f = 50$ Гц. Неравновесные $C-U$ -характеристики измерялись при $f = 3 \cdot 10^5$ Гц и скорости изменения пилообразного напряжения $dU/dt = 2$ В/с. Все измерения проведены при комнатной температуре.

Высокочастотные ($f = 1 \cdot 10^6$ Гц) квазиравновесные $C-U$ -характеристики исходных образцов (не подвергнутых лазерному отжигу) представлены на рис. 1 (кривые 1, 4). При $U > 0$ емкость структур изменяется от некоторого минимального значения (C_{min}), слабо зависящего от смещения вплоть до $U =$

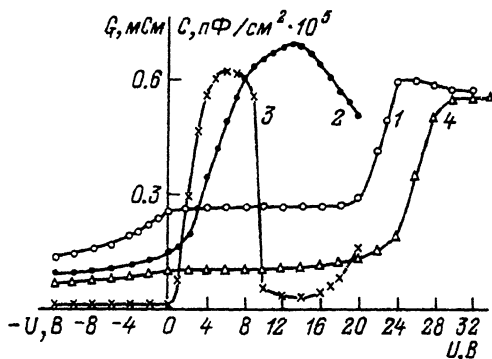


Рис. 1. Квазиравновесные $C-U$ - (1, 2, 4) и $G-U$ -характеристики (3) МДП структур ($f = 1 \cdot 10^6$ Гц) до (1, 4) и после (2, 3) лазерного отжига ($E = 5$ Дж/см²).

1—3 — плоскость (111), 4 — плоскость (100).

$= 20 \div 24$ В, до максимального значения (C_{\max}). Для обеих ориентаций подложки C_{\max} достигается при больших положительных смещениях: $U = +24$ В для подложек (111) и $U = +(28 \div 30)$ В для (100) GaAs.

С понижением частоты тестового сигнала $C-U$ -зависимости сдвигаются в область меньших положительных напряжений. На частоте $f = 10^3$ Гц максимальное значение емкости наблюдается при $U = +6$ В и $U = (10 \div 16)$ В для плоскостей (111) и (100) соответственно. При этом C_{\max} возрастает в несколько раз по сравнению с C_{\max} при $f = 10^6$ Гц.

В области $U < 0$ емкость МДП структур слабо зависит от f и уменьшается с повышением отрицательного потенциала по закону $1/C^2 \sim U$ (см. вставку на рис. 2).

Вольт-фарадные характеристики исходных МДП структур обладают ярко выраженным гистерезисом. Направление обхода гистерезисной петли по часовой стрелке говорит о его электронной природе.

Зависимость активной проводимости G от U изображается кривой с максимумом, положение которого на оси напряжений зависит от частоты измерительного сигнала. В области отрицательных напряжений G незначительно изменяется с повышением U и f .

При освещении белым светом по периметру непрозрачного электрода увеличивается максимальное значение G , а $C-U$ - и $G-U$ -зависимости смещаются в область меньших положительных напряжений. Емкость при $U < 0$ повышается до некоторого стационарного значения, слабо изменяющегося с напряжением (рис. 2, кривые 1, 2). Значения C_{\max} при освещении и без него совпадают.

Облучение структур диэлектрик—полупроводник лазерным пучком с $E = (5 \div 15)$ Дж/см² приводит к сдвигу $C-U$ -характеристик в область меньших положительных смещений (рис. 1, кривые 1, 2). Значение C_{\max} достигается при $U = +(9 \div 14)$ В и $U = (0.5 \div 2)$ В на частотах $f = 1 \cdot 10^6$ и $1 \cdot 10^3$ Гц соответственно. Наклон $C-U$ -кривых на участке заметной модуляции емкости незначительно увеличивается и возрастает C_{\max} .

С увеличением плотности энергии лазерного излучения до $E = (15 \div 20)$ Дж/см² наблюдается аномальный ход вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик. После лазерного отжига проводимость таких структур G при отрицательном потенциале на полевом электроде оказывается выше, чем G при $U > 0$, и динамическая ВАХ принимает вид, показанный на рис. 3. Емкость структур слабо зависит от U при $U > 0$ и резко возрастает в области отрицательных напряжений [$U = -(2 \div 6)$ В].

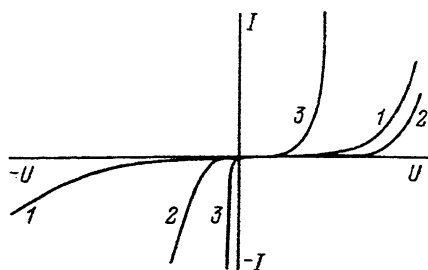
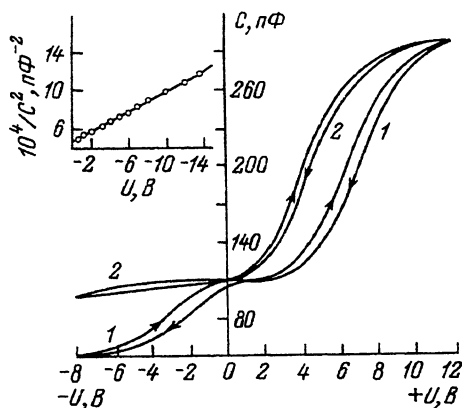


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики ($f = 3 \cdot 10^5$ Гц) МДП структуры ($S = 4.5 \cdot 10^{-3}$ см²). 1 — без освещения, 2 — освещенность 3500 лк. На вставке — зависимость $1/C^2(U)$.

Рис. 3. Динамические ВАХ до (1) и после (2, 3) лазерного отжига по мере увеличения энергии.

Отмеченные выше эффекты наблюдаются для обеих ориентаций полупроводниковых подложек. Однако пороговые энергии, начиная с которых они обнаруживаются, оказались ниже для образцов, полученных на пластинах (111) GaAs.

Как показали оценки, C_{\max} с точностью до 2% совпадает с расчетной емкостью диэлектрика C_d . Расчет C_d проводился по формуле плоского конденсатора в предположении, что диэлектрические проницаемости нитрида бора и нитрида кремния примерно равны [6] и в исходных структурах $\epsilon_d \approx 6$.

При $U \geq 0$ значения C_{\min} для образцов, не подвергнутых ЛО, совпадают с расчетными значениями емкости инверсионного слоя ($C_{\text{ин}}$) с точностью (2÷4)%.

Из результатов, приведенных на рис. 1, видно, что в исходных структурах обедняющий потенциал на поверхности сохраняется вплоть до $U = +(20 \div 24)$ В. Причинами сильного сдвига $C-U$ - и $G-U$ -характеристик вправо, а также их частотной зависимости могут быть высокая плотность поверхностных состояний на границе раздела и дефектность приповерхностной области полупроводника. В соответствии с моделью Спайсера [7, 8] высокая концентрация глубоких центров в области объемного заряда (ООЗ) приводит к появлению дополнительного барьера для основных носителей заряда и тем самым затрудняет выполнение условий обогащения на поверхности.

Спад емкости при $U < 0$ ниже C_{\min} обусловлен утечкой дырок через диэлектрик и малой скоростью их тепловой генерации.

Освещение белым светом повышает генерацию электронно-дырочных пар, и емкость возрастает до C_{\min} (рис. 2, кривые 1, 2). Сдвиг влево вольт-фарадных характеристик при освещении, по-видимому, связан с уменьшением обедняющего потенциала за счет появления барьерной фотоздс, знак которой противоположен знаку загиба зон на поверхности [9]. Сужение гистерезисной петли объясняется заполнением поверхностных ловушек носителями заряда при генерации их светом.

Отмеченные выше изменения электрических характеристик МДП структур после ЛО связаны с превращениями, происходящими на границе раздела полупроводник—диэлектрик.

В результате резко неравновесных процессов, протекающих при импульсном лазерном отжиге, на границе диэлектрик—GaAs возникают сверхвысокие градиенты температуры и механических напряжений, которые вызывают ускоренную диффузию атомов контактируемых материалов [10]. При этом на границе

раздела образуются поверхностные переходные слои, легированные атомами контактируемых материалов. Толщина и концентрация легированных слоев зависят от режимов отжига. Для исследованных нами структур легирование арсенида галлия кремнием из пленки Si_3N_4 сквозь BN приводит к появлению поверхностного n^+ -слоя. Возникновение тонкого высоколегированного слоя вызывает изменение хода потенциала в приповерхностной области арсенида галлия и снижение эффективной высоты дополнительного потенциального барьера и соответственно уменьшение порогового напряжения МДП структуры.

С увеличением энергии в импульсе лазерного излучения повышается концентрация Si в поверхностном слое арсенида галлия. При концентрациях кремния $N_{\text{Si}} > 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в связи с его амфотерностью происходит смена типа проводимости поверхностного слоя с электронного на дырочный, что обуславливает аномальные вольт-амперные (рис. 3) и вольт-фарадные характеристики.

Более высокая чувствительность к воздействию ЛИ МДП структур, полученных на (111) GaAs-подложках, объясняется анизотропией процессов диффузии дефектов, нагрева и охлаждения кристаллов арсенида галлия [11].

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что использование импульсного лазерного отжига позволяет в широких пределах изменять электрические характеристики структур металл— Si_3N_4 —BN—GaAs.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тихов С. В., Мартынов В. В., Карпович И. А., Бедный Б. И. // Электрон. техн. Сер. 2. 1982. № 6 (157). С. 18—23.
- [2] Бараш Е. Г., Кабин А. Ю., Жарин М. Г., Сейсян Р. П. // Электрон. техн. Сер. 6. Материалы. 1988. № 4. С. 76—77.
- [3] Селезнев Б. И., Ткаль В. А. // Физика поверхностных явлений в полупроводниках. Тез докл. VIII совещ. Киев, 1984. Ч. 2. С. 83.
- [4] Селезнев Б. И., Ткаль В. А. // Электрон. техн. Сер. 6. Материалы. 1988. № 5. С. 66—71.
- [5] Зименко В. И., Борисов А. В., Осауленко А. П. // Вестн. Киевского политехн. инст. Радиоэлектроника. 1989. № 26. С. 73.
- [6] Ржанов А. В. Свойства структур металл—диэлектрик—полупроводник. М., 1976. 279 с.
- [7] Spicer W. E., Chye P. W., Skeath P. R., Su C. Y., Linday I. // J. Vac. Sci. Techn. 1979. V. 16. P. 1422.
- [8] Spicer W. E., Linday I., Skeath P. R., Su C. Y. // J. Vac. Sci. Techn. 1980. V. 17. P. 1019.
- [9] Сыноров В. Ф., Ревелева М. А., Алейников Н. М. и др. МДП структуры. Воронеж, 1975. 226 с.
- [10] Воронков В. П., Гурченко Г. А. // ФТП. 1980. Т. 24. В. 10. С. 1831—1834.
- [11] Tulikov A. J., Bourdelle K. K., Chechenin N. G. et al. // J. Phys. Rev. 1988. V. B33. N 1-4. P. 844—847.

Сибирский физико-технический институт
им. В. Д. Кузнецова при ТГУ
Томск

Получена 25.10.1991
Принята к печати 13.02.1992