

ГАШЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ СИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В ДЕЛЬТА-ЛЕГИРОВАННЫХ ОЛОВОМ GaAs-СТРУКТУРАХ

*В.А.Кульбачинский¹⁾, Р.А.Лукин, Е.В.Богданов, В.Г.Кытин,
А.П.Сеничкин, В.И.Кадушкин*

*Московский государственный университет, физический факультет
119899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 10 ноября 1995 г.

После переработки 17 января 1996 г.

Исследована проводимость GaAs-структур, дельта-легированных оловом на вицинальной и сингулярной гранях, в сильных электрических полях до $E = 10^4$ В/см в диапазоне температур $4,2\text{K} < T < 300\text{K}$. Измерения проведены в темноте и при освещении видимым светом. Обнаружена долговременная фотопроводимость 2D-электронов с порогом $T_c \approx 240\text{K}$ в образцах, дельта-легированных оловом на вицинальной грани. Воздействие сильного электрического поля не только гасит фотопроводимость, но и на несколько порядков по отношению к темновому увеличивает сопротивление структур при $T < T_c$.

PACS 72.20.Ht, 72.40.+w

1. Недавно были обнаружены DX-центры олова в легированных оловом гетероструктурах GaAlAs [1, 2]. Ga_{1-x}Al_xAs обнаруживает глубокие электронные уровни, называемые DX-центрами, при концентрации Al $x > 0.2$ [3, 4]. DX-центры возникают также в GaAs под действием гидростатического давления [5, 6]. Свойства DX-центров весьма интересны; например, они могут захватывать термоактивированные носители, причем их оптическая энергия ионизации намного больше наблюдающейся термической [4]. Это приводит к наблюдению при низких температурах долговременной фотопроводимости с характерными временами релаксации до нескольких дней.

В настоящей работе нами исследовались вольт-амперные характеристики в сильных электрических полях (до 10^4 В/см) в диапазоне температур $4.2\text{K} < T < 300\text{K}$ в дельта-легированных оловом GaAs-структурах, выращенных на вицинальной или сингулярной грани. Обнаружена долговременная фотопроводимость 2D-электронов на вицинальной грани, которая исчезает при нагревании выше $T_c \approx 240\text{K}$. При $T < T_c$ сильное электрическое поле не только гасит фотопроводимость но и уменьшает во много раз концентрацию 2D-электронов в GaAs(δ -Sn) образцах на вицинальной грани. В сильных электрических полях наблюдается также гистерезис проводимости при увеличении и уменьшении электрического поля. В образцах, выращенных на сингулярной грани, таких особенностей не наблюдается.

2. Образцы были выращены с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Подложка GaAs(Cr) была разориентирована на небольшой угол $\theta \approx 0.3^\circ$ от плоскости (001) к базовой плоскости (110), что приводит к образованию на поверхности ступеней с расстоянием между ними около 53 нм. В качестве электрически активной примеси при легировании было выбрано олово, которое

¹⁾e-mail: kulb@mig.phys.msu.ru

вследствие значительного отличия своего атомного радиуса от атомного радиуса галлия и высокой диффузионной подвижности должно преимущественно накапливаться на краях ступеней, формируя заряженные цепочки по направлению [110]. То, что олово обладает большой сегрегацией, известно из ряда публикаций [7, 8]. После нанесения олова выращивался слой арсенида галлия при низких температурах эпитаксии, обеспечивающих образование большого количества островков роста на плато ступеней, что должно способствовать сохранению неоднородного распределения олова. Эффективность сегрегации олова на торцах ступеней и ограничение диффузии олова в зарождаемый слой i -GaAs оптимизировалось подбором температуры подложки на разных стадиях роста и вариациями соотношений потоков галлия и мышьяка. Для усиления эффекта сегрегации олова на торцах профилированной поверхности перед легированием осаждался избыточный галлий (несколько долей монослоя). Параметры выращенных структур: подложка GaAs(Cr), буферный слой i -GaAs – 0.35 мкм, дельта-слой олова с поверхностной плотностью атомов $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, верхний слой i -GaAs – 35 нм и контактный слой n^+ -GaAs толщиной около 15 нм, легированный кремнием до уровня 10^{18} см^{-3} . Измерения и расчеты показали, что в таких структурах сосуществуют двумерные электроны и квазиодномерные каналы по направлению [110] за счет неоднородного распределения атомов олова в слое [9].

Кроме роста на вицинальной поверхности, были выращены образцы, дельта-легированные оловом на обычной сингулярной поверхности. Все образцы были изготовлены как с каналом по направлению [110], то есть на вицинальной поверхности ток протекает вдоль ступенек (*ра*-образцы), так и с каналом по направлению [110] (*ре*-образцы).

Вольт-амперные характеристики GaAs(δ -Sn)-структур измерялись на образцах с шириной канала $W = 5 \text{ мкм}$ и длиной $L = 0.3 \text{ мм}$. Для того чтобы избежать формирования доменов, в образце для измерений в сильных электрических полях использовалась импульсная методика с длительностью электрических импульсов 10 нс. Для исследования фотопроводимости освещение образцов осуществлялось мини-лампой, помещенной около образца.

3. Зависимости плотности тока J от напряженности электрического поля E показали анизотропию для *ра*- и *ре*-образцов на вицинальной грани: $J(E)$ насыщались при $E \geq 2000 \text{ В/см}$ для *ра*-образцов и $E \geq 700 \text{ В/см}$ для *ре*-образцов при $T = 300 \text{ К}$. Для *ра*-образцов плотность тока зависит линейно от напряженности электрического поля при 300 К приблизительно до $E = 2000 \text{ В/см}$ и становится сублинейной при понижении температуры. Зависимости $J(E)$, снятые в темноте, для GaAs(δ -Sn)-структур на вицинальной поверхности для *ра*- (1-3) и *ре*- (1а-3а) образцов приведены на рис.1 при трех температурах 300, 77 и 4.2 К. При $T = 4.2 \text{ К}$ при $E > 200 \text{ В/см}$ наблюдается гистерезис в зависимости $J(E)$ (кривые 3 и 3а).

В GaAs(δ -Sn)-структурах на сингулярной поверхности распределение олова более равномерно, хотя анизотропия проводимости наблюдается и у таких образцов: проводимость вдоль [110] направления выше в ≈ 2 раза при 4.2 К, чем вдоль [110]. (На вицинальной поверхности анизотропия проводимости при 4.2 К равна ≈ 4.5). Как показывают исследования поверхности, в этом случае олово формирует островки роста, вытянутые в направлении [110] (см. также [7, 8]), что и является причиной анизотропии проводимости. Однако

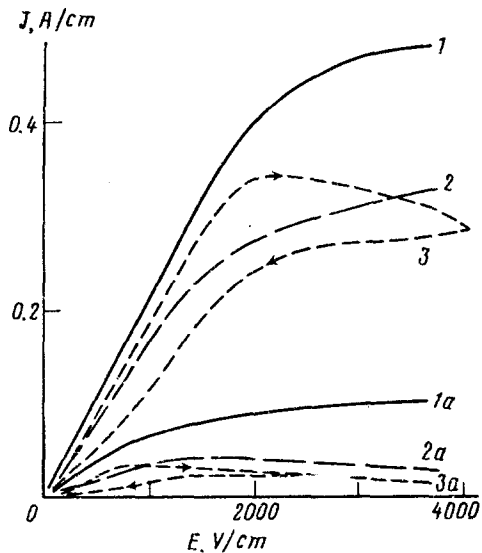


Рис.1. Зависимости плотности тока J от напряженности электрического поля E , снятые в темноте, в $\text{GaAs}(\delta\text{-Sn})$ -структурах на вицинальной поверхности для p - ($1, 2, 3$) и n - ($1a, 2a, 3a$) образцов при 300 К ($1, 1a$), 77 К ($2, 2a$) и 4.2 К ($3, 3a$)

неоднородность распределения олова на сингулярной поверхности существенно меньше, и гистерезиса зависимостей $J(E)$ в этих образцах не обнаружено.

При температурах, меньших критической $T_c \approx 240$ К, наблюдается долговременная фотопроводимость. На рис.2 показана зависимость сопротивления от температуры $\text{GaAs}(\delta\text{-Sn})$ -структуры на вицинальной поверхности для n -образца (a) и p -образца (b) в темноте (кривые 1 полностью воспроизводятся при различных циклах нагревания и охлаждения) и нагревание образцов после освещения при 4.2 К (кривые 2).

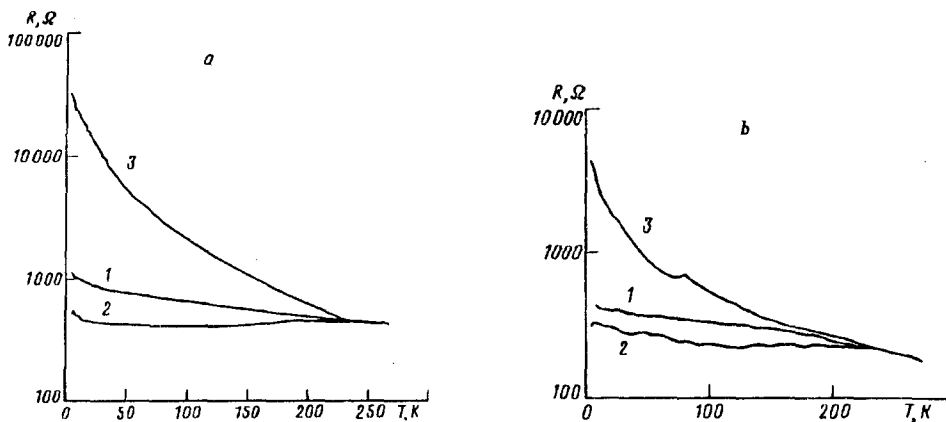


Рис.2. Сопротивление как функция температуры для $\text{GaAs}(\delta\text{-Sn})$ n -образца (a), p -образца (b) на вицинальной поверхности: 1 - нагрев и охлаждение в темноте (полностью воспроизводится), 2 - нагревание после освещения при $T = 4.2$ К, 3 - нагревание после увеличения сопротивления вплоть до насыщения импульсами электрического поля 7000 В/см (a) и 9000 В/см (b) при $T = 4.2$ К

При $T < 240$ К, прикладывая импульсы высокого электрического поля, можно не только погасить фотопроводимость, но и существенно понизить про-

димность структур по отношению к темновой. Вначале сопротивление растёт и после нескольких сот коротких импульсов электрического поля насыщается. На рис.2 (кривые 3) показаны зависимости сопротивления от температуры при нагревании образцов после серии импульсов электрического поля $E = 7000$ В/см (а) и $E = 9000$ В/см (б), приложенных при $T = 4.2$ К.

При $T < T_c$ сопротивление, релаксирует к равновесному значению. Уменьшение сопротивления в темноте после насыщения в сильном электрическом поле при $T = 4.2$ К можно аппроксимировать двумя экспоненциальными зависимостями с двумя разными характерными временами $t_1 \approx 1$ мин и $t_2 \approx 5 - 6$ ч. В качестве примера на рис.3 приведены зависимости сопротивления от времени для одного из *ре*-образцов GaAs(δ -Sn) на вицинальной поверхности при $T = 4.2$ К. На рис.4 приведены зависимости $J(E)$ для того же *ре*-образца GaAs(δ -Sn) при 4.2 К при постоянном освещении.

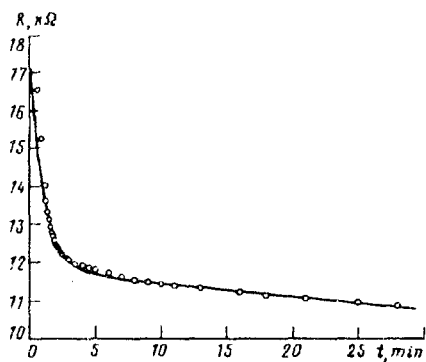


Рис.3. Релаксация высокоомного состояния при $T = 4.2$ К после приложения импульсного электрического поля $E = 7000$ В/см до насыщения сопротивления GaAs(δ -Sn)-структуры на вицинальной поверхности, *ре*-образец. Точки – экспериментальные значения, линия – аппроксимация двумя экспоненциальными функциями

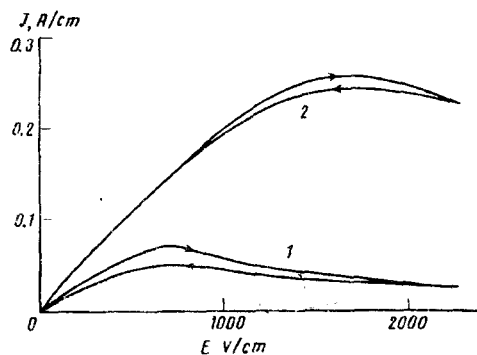


Рис.4. Зависимости плотности тока J от напряженности электрического поля E для GaAs(δ -Sn) *ре*-образца на вицинальной поверхности при постоянном освещении при $T = 4.2$ К. Кривая 2 записана при интенсивности освещения в 20 раз больше

4. Долговременную фотопроводимость можно связать с DX-центрами олова в GaAs(δ -Sn)-структурах на вицинальных гранях. Наблюдающееся гашение фотопроводимости и уменьшение проводимости структур при воздействии импульсов сильного электрического поля может быть объяснено уменьшением концентрации 2D-электронов за счет захвата их DX-центрами, которому способствует сильное электрическое поле. Два факта подтверждают это предположение: 1) насыщение сопротивления после серии импульсов сильного электрического поля (то есть число центров захвата ограничено) и 2) время релаксации – порядка нескольких часов (рис.3), что характерно для DX-центров [4]. Отметим, что для DX-центров характерны резко различные энергии оптической и термической активации. Известно, что глубокие уровни или DX-центры могут захватывать электроны, и этот захват сильно зависит от температуры [4]. Это является причиной задержанной фотопроводимости при низких температурах. При этом характерные времена захвата электронов составляют часы. Напомним, что DX-центры наблюдались в легированных оловом структурах (см.,

например, [1, 2]). Более того, наблюдалось два различных уровня, DX1 и DX2 [1, 10, 11]. DX1 имеет оптическую энергию активации ≈ 0.19 эВ, энергия второго приблизительно 0.32 эВ. Два различных наблюдаемых времени релаксации фотопроводимости можно приписать DX1 и DX2.

Гистерезис вольт-амперных характеристик и гашение фотопроводимости сильным электрическим полем не наблюдались в GaAs(δ -Sn)-структурах на сингулярной поверхности, а, согласно полученным результатам, дельта-легирование вицинальной поверхности GaAs оловом приводит к его более неоднородному распределению. Таким образом, неоднородное распределение олова играет важную роль в возникновении описанных эффектов. Отметим, что в дельта-легированных кремнием структурах GaAs наблюдалась отрицательная фотопроводимость, то есть уменьшение концентрации носителей, которую авторы связали с DX-центрами, возникающими в GaAs в связи с неоднородным распределением примеси при дельта-легировании [12]. Релаксация также была двухступенчатой – быстрая и медленная.

В заключение отметим, что нельзя полностью исключить возможность объяснения описанных явлений возникновением потенциального рельефа из-за неоднородного распределения олова. Такой рельеф, в принципе, может способствовать захвату электронов в сильном электрическом поле.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 95-02-06021а и International Science Foundation.

-
1. S.Brehme, *Semicond. Sci.Technol.* **5**, 983 (1990).
 2. J.Makinen, T.Laine, K.Saaranen et al., *Phys. Rev. Lett.* **71**, 3154 (1993).
 3. D.V.Lang, R.A.Logan, and M.J.Jaros, *Phys. Rev. B* **19**, 1015 (1979).
 4. P.M.Mooney, *J. Appl. Phys.* **67**, R1 (1990).
 5. J.Zeeman, M.Zigone, and G.Martinez, *Phys. Rev. B* **51**, 17551 (1995).
 6. *Physics of DX centers in GaAs alloys*, Ed. J.C.Bourgoin, *Solid. State Phenomena*, **10**, Sci-Tech, Brookfield, VT, 1990.
 7. J.J.Harris, B.A.Joyce, J.P.Gowers, and J.H.Neave, *Appl. Phys. A* **28**, 63 (1982).
 8. J.J.Harris, D.E.Ashenford, C.T.Foxon et al., *Appl. Phys. A* **33**, 87 (1984).
 9. V.I.Kadushkin, V.A.Kulbachinskii, A.P.Senichkin et al., *Phys. Low-Dim. Struct.* **1**, 53 (1994).
 10. Q.S.Huang, H.Lin, J.Y.Kang et al., *J.Appl. Phys.* **71**, 5952 (1992).
 11. J.Griado, A.Gomes, E.Caleja, and E.Munoz, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 660 (1988).
 12. A.G.de Oliveira, G.M.Ribeiro, D.A.Soares, and H.Chacham, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 2258 (1994).