

волны, а тем самым и ее относительную фазовую скорость β_ϕ и сравнить ее с расчетной величиной для циклотронной волны

$$\beta_\phi = \frac{\omega\beta}{\Omega} = \frac{mc\omega}{eB_0} \beta\gamma,$$

где $\beta = u/c$ — относительная скорость электронов. Результаты измерений и расчета приведены на рис. 3.

Измерение амплитуды продольной составляющей магнитного поля МЦВ, выполненное по результатам показаний одного из магнитных зондов, дает величину ~ 17 Гс (соответствует ~ 0.5 МВ/м) при расположении зонда в 3.5 см от оси камеры. При приближении зонда к пучку наведенный сигнал увеличивается; экстраполяция показаний зонда на внешнюю границу пучка приводит к значению амплитуды компоненты B_z , соответствующему 6—10 МВ/м. Заметим, что линейная теория МЦВ в электронном пучке [7] дает для связи амплитуд компонент E_z и B_z соотношение $B_z = \beta E_z$.

Основной вывод работы заключается в том, что в стомегаваттном электронном пучке без использования внешнего генератора возбуждена азимутально-симметричная медленная циклотронная волна микросекундной длительности.

Список литературы

- [1] Sloan M. L., Drummond W. E. // Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 31. N 20. P. 1234—1237.
- [2] Иванов Б. И., Горожанин Д. В., Мирошниченко В. А. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 18. С. 1112—1116.
- [3] Cornet E., Davis H. A., Starke T. P. et al. // Phys. Fluids. 1981. Vol. 24. N 11. P. 2039—2048.
- [4] Гиротрон. Сб. статей. Горький, 1981. 254 с.
- [5] Казанский Л. Н., Краснопольский В. А., Крылов С. Ю. и др. // Функциональные узлы и системы ускорителей заряженных частиц. М., 1984. С. 3—9.
- [6] Гинзбург Н. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22. № 4. С. 470—479.
- [7] Капчинский М. И., Юдин Л. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 2. С. 151—160.

Поступило в Редакцию
12 июля 1988 г.

В окончательной редакции
22 мая 1989 г.

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ—СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК—ПОЛУПРОВОДНИК НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$

Д. Н. Санджиев, Н. А. Косоногов, Э. А. Савченко,
Е. Д. Розач, Н. П. Проценко

Ранее нами сообщалось об исследовании гистерезисных эффектов в структурах металл—сегнетоэлектрик—полупроводник (МСЭП) на основе тонких пленок тиофосфата олова $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$, нанесенных на подложки из монокристаллического кремния р-типа удельного сопротивления 10 Ом·см [1].

Эффект поля тесно связан с положением уровня Ферми в полупроводнике, который в свою очередь определяется степенью легирования или же удельным сопротивлением полупроводника. В данной работе методами вольт-фарадных (ВФХ) и вольт-сименсных характеристик (ВСХ) исследованы аналогичные структуры с удельным сопротивлением подложки 70 Ом·см.

Тонкие пленки $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$ наносились на монокристаллические кремниевые подложки с ориентацией (111) методом вакуумного термического испарения в квазизамкнутом объеме (метод «горячей стенки») [2]. На свободные поверхности пленки и подложки были напылены алюминиевые электроды. Круглые электроды на поверхности пленки имели площадь 2.5—

3 мм². Толщина пленок 3—5 мкм. Характеристики снимались мостовым методом с использованием синхронного детектора. Характеристики получены в динамическом режиме при частоте управляющего напряжения 0.01 Гц и частотах измерительного поля 80—10 000 Гц.

На рис. 1 показаны ВФХ и ВСХ образца при амплитуде управляющего напряжения 10 В и двух частотах измерительного поля. Характеристики сняты при комнатной температуре. Можно отметить следующие особенности этих характеристик: 1) гистерезис характеристик носит запаздывающий характер; 2) на участке ВФХ, соответствующем режиму инверсии, при увеличении положительного напряжения емкость возрастает при всех использованных частотах измерительного поля, что соответствует «низкочастотной» ВФХ структур металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) [3]; 3) точки максимумов вольт-сименсных характеристик лежат на участках наиболее крутого изменения емкости с напряжением; 4) в режиме обогащения емкость структуры, определяемая емкостью сегнетоэлектрической пленки, уменьшается с ростом частоты измерительного поля.

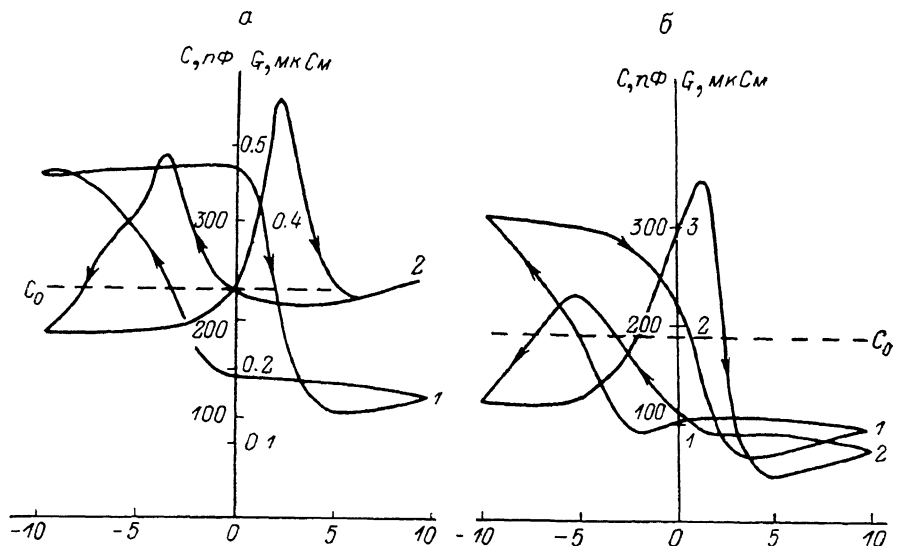


Рис. 1. Вольт-фарадные (1) и вольт-сименсные (2) характеристики структур Al—Sn₂P₂S₈—Si, полученные при двух частотах измерительного поля.

а — 800 Гц, б — 10 кГц. C₀ — теоретически рассчитанная емкость плоских зон.

Характер гистерезиса ВФХ указывает на переполаризацию пленки, которая, по-видимому, не является полной, так как она не сопровождается уменьшением емкости пленки при увеличении отрицательного напряжения.

«Низкочастотный» вид участков инверсии проводимости на ВФХ связан, по-видимому, с относительно высоким удельным сопротивлением подложки, использованной в данных исследованиях, при котором сильная инверсия проводимости наступает при меньших изгибах зон в полупроводнике и соответственно при меньших значениях управляющего напряжения [4].

Положение пиков активной проводимости в сопоставлении с ВФХ показывает, что они не связаны с переполаризацией пленки, как можно было бы предположить, имея дело с сегнетоэлектрическим объектом. Они могут быть связаны с достижением состояния плоских зон у границы полупроводник—сегнетоэлектрик при наличии инерционных поверхностных состояний, что наблюдается в реальных МДП структурах [3, 5, 6]. В пользу такого предположения говорит проведенный нами расчет емкости плоских зон для идеальной МДП структуры с параметрами, совпадающими с параметрами исследованной здесь МСЭП структуры (диэлектрической проницаемостью и толщиной диэлектрика, уровнем легирования полупроводника). Методика расчета приведена в [3]. Результаты показывают, что емкость плоских зон достигается на прямой и обратной ветвях ВФХ при тех же напряжениях, что и пики активной проводимости (штриховые линии на рис. 1).

Четвертая особенность ВФХ отражает низкочастотную дисперсию емкости сегнетоэлектрической пленки Sn₂P₂S₈, связанную, как указывалось в [7], с наличием приповерхностных барьерных слоев.

На рис. 2 показаны ВФХ при разных амплитудах управляющего напряжения. Это семейство кривых отличается от показанного ранее следующими особенностями: 1) на участках ВФХ, соответствующих режимам обогащения и инверсии ($U_{упр} > 20$ В), наблюдается уменьшение емкости с напряжением, обязанное, по-видимому, переполаризации пленки; 2) при увеличении амплитуды управляющего напряжения запаздывающий характер гистерезиса сменяется опережающим.

Спад емкости с напряжением на участках обогащения и инверсии при опережающем характере гистерезиса ВФХ наблюдался ранее Ву на структурах $Bi_4Ti_3O_{12}-Si$ [8] и связывался им также с переполаризацией сегнетоэлектрической пленки, сопровождаемой инжекцией носителей заряда как из обогащенного, так и из инверсионного слоя полупроводника в сегнетоэлектрик. Эволюция петли ВФХ при увеличении амплитуды управляющего напряжения, показанная на рис. 2, позволяет привлечь такую гипотезу и в нашем случае. Характерно, что этот эффект наблюдался на наших структурах при относительно высоких удельных сопротивлениях подложки.

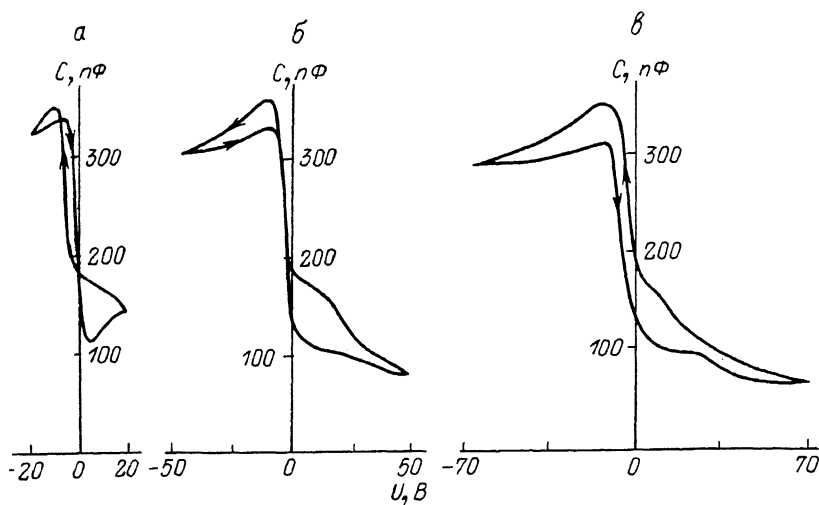


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики структур $Al-Sn_2P_2S_6-Si$ при различных амплитудах управляющего напряжения.

Частота измерительного поля 800 Гц. а — 20, б — 40, в — 60 В.

В МСЭП структуре переполаризация сегнетоэлектрика тесно связана с условиями экранирования спонтанной поляризованности зарядами в полупроводнике [9]. Наступление сильной инверсии проводимости улучшает условия экранирования и способствует переполаризации. При этом создаются условия для инжекции экранирующего заряда из полупроводника в сегнетоэлектрик, как и в случае режима обогащения.

Исследованные нами структуры отличаются от идеальных по крайней мере наличием поверхностных состояний (их концентрация, вычисленная по методике, описанной в [10], составила $6-8 \cdot 10^9$ (эВ \cdot см $^{-2}$) $^{-1}$) и приповерхностных барьерных слоев в сегнетоэлектрике, упомянутых выше. Из-за этих слоев связанный заряд сегнетоэлектрика не выходит полностью на границу раздела, так что экранирование остаточной поляризованности зарядом, локализованным в полупроводнике, в его инверсионном или обогащенном слое является несовершенным [11] и приводит к наличию электрического поля в области границы, стимулирующей инжекцию этого заряда в пленку. Наличие инжекции подтверждается также вольт-амперными характеристиками (ВАХ) МСЭП структур, снятыми в статическом режиме. Гистерезис ВАХ имеет опережающий характер.

При относительно малых амплитудах управляющего поля величина остаточной поляризованности недостаточна для инжекции неосновных носителей в режиме обеднения—инверсии, кривая ВФХ имеет вид, показанный на рис. 2, а, с преобладанием поляризационного механизма гистерезиса.

При повышении температуры низкочастотные ВФХ принимают вид, характерный для структур металл—сегнетоэлектрик—металл (МСЭМ) [12], а при дальнейшем повышении температуры приближаются к горизонтальной прямой, как у структуры металл—диэлек-

трик—металл (МДМ), вследствие исчезновения спонтанной поляризованности (фазовый переход в пленке $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ происходит при температуре около 70 °C).

Таким образом, проведенные исследования показали, что с увеличением удельного сопротивления полупроводника эффект поля в МСЭП структуре $\text{Al—Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6\text{—Si}$ приобретает новые черты: переполаризация пленки сопровождается инжекцией носителей из полупроводника в сегнетоэлектрик при обеих полярностях управляющего напряжения; при одной полярности управляющего напряжения инжекция идет из обогащенного слоя полупроводника, при другой — из инверсионного. При повышении температуры уменьшается время релаксации неосновных носителей в полупроводнике, что улучшает условия экранирования остаточной поляризованности и приближает свойства МСЭП структуры к свойствам структуры металл—сегнетоэлектрик—металл.

Список литературы

- [1] Проценко Н. П., Рогач Е. Д., Савченко Э. А., Санджиев Д. Н. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 11. С. 2274—2276.
- [2] Фрейк Д. М. // ПТЭ. 1976. Вып. 5. С. 7—17.
- [3] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. 456 с.
- [4] Свойства структур металл—диэлектрик—полупроводник / Под ред. А. В. Ржанова. М.: Наука, 1976. 280 с.
- [5] Nicollian E. H., Goetzberger A. // Bell Syst. Tech. J. 1967. Vol. 46. N 9. P. 1055—1062.
- [6] Singh A., Simmons J. G. // Sol. St. Electronics. 1982. Vol. 25. N 3. P. 219—226.
- [7] Рогач Е. Д., Проценко Н. П., Савченко Э. А. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1987. Т. 51. Вып. 12. С. 2269—2272.
- [8] Wu S. Y. // IEEE Trans. Electron Devices. 1974. Vol. ED-21. N 8. P. 499—504.
- [9] Würfel P., Batra I. P. // Ferroelectrics. 1976. Vol. 12. N 1—4. P. 55—61.
- [10] Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
- [11] Fridkin V. M., Grekov A. A., Korchagina N. A. et al. // Ferroelectrics. 1984. Vol. 61. N 1-2. P. 299—304.
- [12] Проценко Н. П., Рогач Е. Д., Савченко Ф. И. и др. // Полупроводники—сегнетоэлектрики. Вып. 4. Ростов-на-Дону, 1986. С. 112—117.

Ростовский-на-Дону
государственный университет
Научно-исследовательский
институт физики

Поступило в Редакцию 26 июля 1988 г.
В окончательной редакции
24 мая 1989 г.

05; 09

Журнал технической физики, т. 60, в. 1, 1990

© 1990 г.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ ПОГЛОЩЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ КЕРАМИКИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. И. Смирнов, О. Е. Якимченко, Г. Г. Лазарев,
К. В. Мицен, Я. С. Лебедев

Взаимодействие электромагнитных СВЧ полей с высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП) интенсивно изучается в настоящее время и в связи с возможными техническими применениями, и как один из подходов к выяснению природы ВТСП. Исследование такого взаимодействия в зависимости от приложенного магнитного поля стало особенно популярным благодаря использованию чувствительной техники ЭПР [1-3]. Однако при стандартной постановке эксперимента можно получить сведения только об усредненном по образцу поглощении СВЧ энергии. Между тем очевидно, что такое поглощение не может быть равномерно распределено по материалу вследствие скин-эффекта, а также макроскопической неоднородности большинства реальных образцов ВТСП. В магнитном поле к этому добавляется еще и неоднородное по образцу разрушение сверхпроводящего состояния.

В настоящей работе сделана попытка оценить возможности ЭПР томографии в исследовании пространственной неоднородности СВЧ поглощения в ВТСП. Принцип ЭПР томографии