

УДК 534.222.2

ВЗРЫВНОЕ УСИЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ
АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ

Леонов А. С.

Экспериментально обнаружен и исследован эффект «взрывного» усиления поверхностных акустоэлектронных флуктуаций в неравновесной структуре пьезоэлектрик-полупроводник с током.

Взрывное усиление акустических волн в пьезоэлектрических полупроводниках со сверхзвуковым дрейфом носителей заряда было предсказано теоретически в работах [1, 2]. Его характерной особенностью является более быстрый в сравнении с линейным одновременный рост амплитуд взаимодействующих волн. Взрыв может возникать как при параметрическом взаимодействии волн (в частности, волны со своей второй гармоникой [1]), так и при взаимодействии нарастающих акустических флуктуаций в условиях развития акустоэлектронной неустойчивости [2]. Несмотря на то что этот эффект теоретически предсказан достаточно давно, до настоящего времени не было сообщений о его наблюдении.

В данной работе сообщается об экспериментальном обнаружении эффекта взрывного усиления поверхностных акустоэлектронных флуктуаций в неравновесной структуре пьезоэлектрик-полупроводник и о результатах его исследования¹.

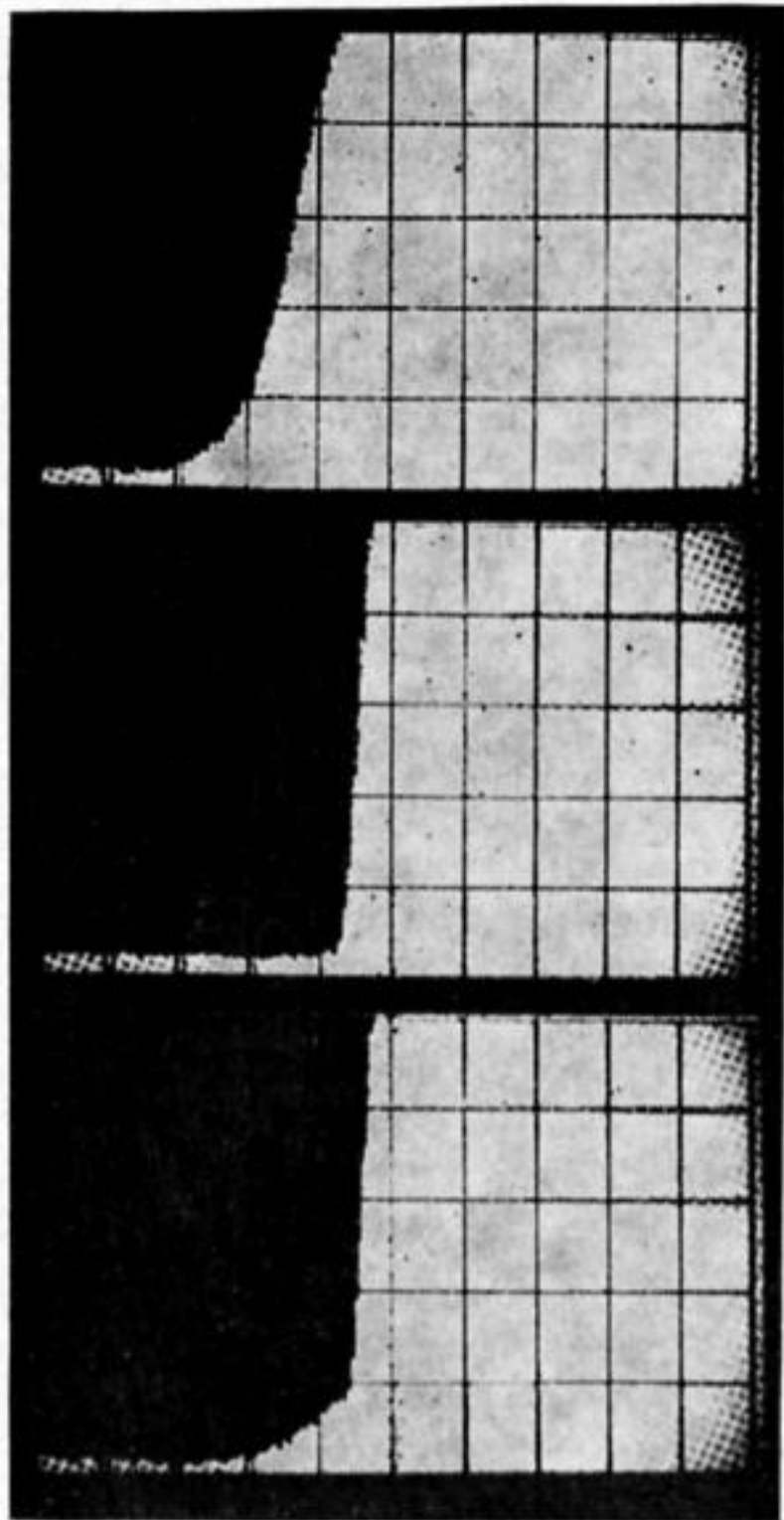
Эксперименты были выполнены на макетах слоистых акустоэлектронных генераторов $\text{LiNbO}_3\text{—Ge}$, $\text{LiNbO}_3\text{—Si}$ с акустическими резонаторами кольцевого типа [3]. Время пробега рэлеевской поверхностной акустической волны по кольцевому резонатору составляло ≈ 14 мкс, потери энергии на полный пробег $\approx 30\%$. Образцы германия имели удельное сопротивление 20—30 Ом·см, кремния — 200 Ом·см. На торцах полупроводниковых пластин были изготовлены электрические контакты, на которые подавалось напряжение, создающее сверхзвуковой дрейф носителей заряда. Генерируемые поверхностные волны регистрировались при помощи широкополосного встречно-штыревого преобразователя и селективного микровольтметра с полосой пропускания 120 кГц. Минимальная регистрируемая интенсивность флуктуаций составляла $3 \cdot 10^{-7}$ Вт/см·МГц.

В процессе развития неустойчивости в акустоэлектронном генераторе можно выделить два этапа. На первом этапе происходит экспоненциальный (линейный) рост интенсивности поверхностных акустоэлектронных флуктуаций (в дальнейшем просто флуктуаций), распространяющихся в направлении дрейфа основных носителей заряда. Частотный спектр нарастающих волн при этом сужается вблизи частоты максимального линейного усиления f_m ($f_m \sim 100\text{—}140$ МГц). В результате в спектре образуется сравнительно узкий максимум интенсивности шириной $\Delta f \sim 0,5\text{—}5$ МГц. Далее с ростом интенсивности акустического потока существенную роль начинает играть взаимодействие спектральных компонент флуктуаций, связанное с нелинейностью электронной подсистемы. Эффект взрывного усиления наблюдается в начале нелинейного этапа развития неустойчивости при относительно слабой нелинейности.

Изменение во времени амплитуд различных спектральных составляющих акустического потока показано на фигуре. Верхняя осциллограмма соответствует флуктуациям с частотами $\sim f_m$, которые нарастают с максимальным линейным инкрементом и первыми достигают регистрируемо-

¹ Результаты работы частично изложены в обзорном докладе на 3 Международной школе по физике конденсированного состояния. Варна, 1984 г.

го уровня. После того как интегральная интенсивность колебаний в основном максимуме вблизи f_m становится достаточно большой, порядка 10^2 мВт/см, начинается быстрый, взрывной рост спектральных составляющих в широкой области частот выше и ниже f_m , который показан на средней осциллограмме. Переход от этапа линейного усиления к взрывному ясно виден на нижней осциллограмме, где показано изменение во



Изменение во времени амплитуд спектральных составляющих флуктуаций. Сигналы на осциллограммах ограничены сверху размером экрана осциллографа

времени амплитуды спектральной компоненты с частотой f , близкой к f_m . Эффект проявляется в виде резкого изменения скорости роста амплитуды колебаний.

Величина инкрементов нарастающих флуктуаций приблизительно одинакова во всей частотной области неустойчивости и при не очень большой скорости дрейфа превышает максимальный линейный инкремент² в 2—3 раза. В процессе взрывного роста усиливаются и такие низкочастотные моды, которые в отсутствие флуктуаций с частотами $\sim f_m$ затухают. Область частот, в которой наблюдается нелинейное усиление, составляет вблизи порога генерации 60—100 МГц. С ростом дрейфовой скорости носителей заряда происходит расширение области взрыва главным образом в сторону более низких частот. Взрывной рост интенсивности акустических колебаний продолжается в течение нескольких пробегов по резонатору. Затем в области сильной нелинейности усиление ограничивается и происходит дальнейшая перестройка спектра с появлением низкочастотных максимумов [4]. Интегральная интенсивность выросших взрывным образом флуктуаций достигает величины $\sim (1-3) \cdot 10^2$ мВт/см.

Одной из наиболее вероятных причин наблюдаемого эффекта могут быть каскадные параметрические процессы в потоке флуктуаций [5], которые приводят к пере-

даче энергии из основного максимума в боковые моды. Для выяснения их роли проделаны модельные эксперименты по исследованию влияния когерентной поверхностной акустической волны накачки с частотой f_m на усиление флуктуаций и слабой сигнальной волны произвольной частоты. Накачка имитировала основной максимум в спектре флуктуаций, а слабый сигнал — отдельную спектральную составляющую шума. Накачка и сигнал возбуждались в структуре одновременно парой высокочастотных генераторов при помощи встречно-штыревых преобразователей.

Выяснено, что при интенсивности накачки, сравнимой с интегральной интенсивностью колебаний в основном максимуме на этапе взрыва, нелинейное взаимодействие приводит к уменьшению инкрементов и сигналов и флуктуаций. Интенсивности волн на комбинационных частотах при этом существенно не увеличиваются, т. е. уменьшение инкрементов не связано с перераспределением энергии по спектру за счет трехволнового взаимодействия. В некоторых структурах при значительно меньших уровнях накачки наблюдалось увеличение инкрементов сигналов за счет параметрического усиления, однако они оставались в несколько раз меньше инкрементов флуктуаций во время взрыва. Кроме того, в исследованных структурах не происходит одновременного роста усиления при вырожденном параметрическом взаимодействии волны со своей второй гармоникой,

² Линейный инкремент учитывает электронное усиление в активной области и потери энергии, связанные с резонатором.

который предсказывает теория [1]. Данные этих экспериментов позволяют утверждать, что трехволновые параметрические процессы не играют существенной роли в обсуждаемом явлении.

Наиболее важный с точки зрения объяснения наблюдаемого эффекта результат изложенных выше экспериментов состоит в том, что при относительно слабой нелинейности когерентная и шумовая накачки оказывают принципиально различное влияние на усиление флуктуаций. Именно шумовая накачка увеличивает инкременты флуктуаций в условиях акустоэлектронной неустойчивости, а когерентная уменьшает. Подобное различие может быть объяснено тем, что в потоке флуктуаций с широким спектром доминирует специфический тип нелинейного взаимодействия, который не играет существенной роли в случае когерентных волн. В теории объемных акустических флуктуаций такой тип взаимодействия известен [2, 6, 7]. Он связан с четырехволновыми процессами, в которых принимают участие сильнозатухающие колебания электронной плотности. При определенных условиях четырехволновые (непайерлсовские) процессы приводят к увеличению инкрементов всех взаимодействующих волн, пропорциональному интегральной интенсивности акустического потока. Соответствующее кинетическое уравнение, справедливое в слабонелинейном приближении, допускает взрывное решение, при котором интенсивность флуктуаций на конечном расстоянии обращается в бесконечность [2].

Наблюдаемое взрывное усиление поверхностных флуктуаций предположительно также может быть связано с непайерлсовскими процессами, поскольку другие типы взаимодействия не дают столь существенных различий в поведении случайных и регулярных волн. Условие, при котором четырехволновые процессы преобладают над обычными трехволновыми, с запасом выполнялось в проведенных экспериментах. Оценки, аналогичные сделанным в работе [2], показывают, что фигурирующий в теории параметр λ , который должен быть больше 1, в исследованных структурах был больше 10.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильник З. Ф. Генерация второй акустической гармоники и взрывная неустойчивость акустоэлектронных волн // ФТП. 1976. Т. 10. № 9. С. 1691—1695.
2. Кулакова Л. А., Лайхтман Б. Д. Теория нелинейного усиления шумов в пьезополупроводниках // ФТТ. 1977. Т. 19. № 9. С. 1778—1789.
3. Балакирев М. К., Богданов С. В., Леонов А. С. Генерация акустических поверхностных волн в слоистой системе ниобат лития — германий // ФТТ. 1980. Т. 22. № 5. С. 1332—1335.
4. Balakirev M. K., Bogdanov S. V., Leonov A. S. Interaction and spectra of the surface acoustoelectric fluctuations // Sol. St. Commun. 1983. V. 47. № 6. P. 463—467.
5. Zoroglu D. S., Chang I.-C. Spectral investigation of acoustoelectric domains in *n*-GaAs by microwave emission studies // Journ. Appl. Phys. 1970. V. 44. № 6. P. 2294—2298.
6. Гуревич В. Л., Каган В. Д., Лайхтман Б. Д. Теория взаимодействия нарастающих звуковых флуктуаций в полупроводниках // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. № 1. С. 188—204.
7. Ганцевич С. В., Каган В. Д., Катилус Р. Диаграммная техника для фононной турбулентности // ЖЭТФ. 1974. Т. 67. № 5. С. 1765—1783.

Институт физики полупроводников
СО Академии наук СССР

Поступила в редакцию
22.V.1986