

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЙ

С.Г. ГЕВОРГЯН, Г.Д. МОВСЕСЯН, А.А. МОВСИСЯН,
А.Л. ГЮЛАМИРЯН, В.А. ШИНДЯН, О.Г. ШИРИНЯН

Институт физических исследований НАН Армении

(Поступила в редакцию 19 ноября 1996г.)

Обсуждаются некоторые особенности физических свойств высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), которые могут быть успешно использованы для детектирования элементарных частиц и ионизирующих излучений. Рассмотрены перспективы создания сверхпроводниковых детекторов принципиально нового класса на ВТСП. Оценены возможности этих детекторов, указаны реальные направления их дальнейшего существенного усовершенствования и некоторые области их применения.

В качестве методов детектирования элементарных частиц и ионизирующих излучений были предложены различные низкотемпературные свойства веществ, в том числе и многие особенности физики сверхпроводников (см. литературу в [1-6]). Как показали многочисленные исследования, некоторые из них впоследствии оказались подходящими для этого дела и в настоящее время эффективно используются не только для детектирования частиц и излучений, но также и в других областях науки и техники. Итог основных достижений в этой области до настоящего времени, а также планы на будущее можно найти в недавно опубликованном тематическом обзоре [7]. Однако подробное ознакомление с безусловно большими научно-техническими достижениями в этой области привело нас к заключению, что тем не менее существуют некоторые существенные упущения и недостатки в деле детектирования частиц и излучений с помощью сверхпроводников, а именно: отсутствие методов, использующих высокотемпературные сверхпроводники при детектировании элементарных частиц и

ионизирующих излучений, а также громоздкость и дороговизна криогенной техники, используемой в действующих и проектируемых детектирующих системах.

В настоящей статье обсуждены некоторые особенности электрофизических свойств высокотемпературных сверхпроводников, которые могут быть успешно использованы для создания новых высокочувствительных и менее дорогих (с точки зрения используемой криогенной техники) детекторов частиц и излучений.

Известно, что по сравнению с гелиевыми сверхпроводниками глубина скин-слоя ВТСП материалов из-за сравнительно плохой электропроводности очень велика [8]. Вследствие этого радиочастотное (РЧ) электромагнитное поле, приложенное к поверхности ВТСП плёнки толщиной в несколько микрометров, будет пронизывать её насквозь в нормальном состоянии и почти полностью (с точностью до эффекта Мейснера [9]) будет экранировано в сверхпроводящем состоянии. В противоположность этому, плёнка такой же толщины из гелиевого сверхпроводника благодаря малой скин-глубине существенно экранирует внешнее РЧ поле как в нормальном, так и в сверхпроводящем состояниях [10].

Именно эта сильно выраженная разница экранировки РЧ электромагнитного поля ВТСП плёнкой определённой толщины в нормальном и сверхпроводящем состояниях была успешно использована нами для прецизионной и бесконтактной регистрации сверхпроводящих фазовых переходов тонкоплёночных ВТСП структур и, в частности, для детектирования лазерного (с длиной волны 0,63 мкм) и инфракрасного (с длиной волны 0,8 мкм) монохроматических излучений, естественного дневного света, также, как и постоянных магнитных полей и токов, пропущенных через ВТСП тонкоплёночные структуры.

На самом деле, если ВТСП плёнку разместить на поверхности открытой плоской катушки, приготовленной из проволоки с хорошей электропроводностью (например, типа спирали Архимеда, как это показано на рис.1), то при её переходе из сверхпроводящего в нормальное состояние под внешним воздействием (будь то элементарные частицы, ионизирующее излучение, постоянные магнитные поля или же токи, пропущенные через ВТСП плёнку) вблизи поверхности плоской

измерительной (детектирующей) катушки будет наблюдаться существенное искажение распределения РЧ поля плёнкой. Экспериментально было показано, что это искажение распределения силовых линий плоской катушки ВТСП плёнкой при сверхпроводящем фазовом переходе возможно успешно зарегистрировать применением измерительной (детектирующей) техники, основанной на генераторах на туннельном диоде (ТД) [11-13], где традиционно используемые объёмные цилиндрические катушки заменены необычными плоскими катушками [14]. Мы считаем, что это стало возможным, в первую очередь, благодаря удачно выбранной конструкции детектирующего элемента, каковым является необычная открытая плоская катушка, а также из-за значительно большей (по сравнению с гелиевыми сверхпроводниками) величине скин-глубины ВТСП плёнки, являющейся чувствительным элементом детектора. Высокая стабильность частоты генерируемых маломощными генераторами на ТД колебаний также оказалась определяющей [11-15]. Для получения высокой чувствительности (путём уменьшения уровня шумов) понадобилось дополнительное усовершенствование существующей ранее традиционной детектирующей техники, основанной на генераторах на ТД. С этой целью нами был использован охлаждаемый опорный генератор, аналогичный измерительному [11], который заменил применяемые обычно кварцевый опорный генератор или синтезатор частоты, действующие при комнатных температурах [15]. Таким образом удалось значительно уменьшить уровень шумов отклонения (the deviation noises) и почти полностью компенсировать температурный ход детектирующей системы во всём интервале рабочих температур. Для снижения уровня тепловых шумов дополнительно был использован криогенный смеситель, собранный на таком же туннельном диоде, какой использовался в измерительном (детектирующем) генераторе [13]. В результате только этих двух новшеств отношение сигнал/шум возросло на 2-3 порядка. Создание же работающих вплоть до комнатных температур маломощных, высокостабильных по частоте генераторов на ТД с открытыми плоскими измерительными катушками нелегко из-за относительно низкой добротности открытых измерительных катушек. Нашей группе удалось преодолеть эти трудности [14].

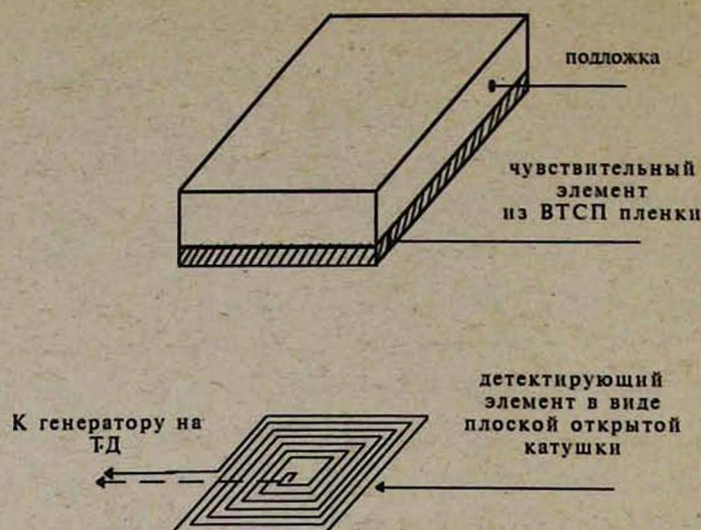


Рис.1. Схематическое изображение детектирующего и чувствительного элементов в детекторах "экранирующего" типа.

Заметим, что в вышеописанной детектирующей системе удобной регистрируемой величиной является частота генерации $F_{\text{изм}}$ (или $\Delta F = F_{\text{изм}} - F_{\text{опорн}}$, или её сдвиг $\delta(\Delta F)$) [11,13,14]. Легко показать, что максимальный сдвиг частоты генератора на ТД при экранировке РЧ измерительного поля открытой плоской детектирующей катушки ВТСП плёнкой при её сверхпроводящем переходе примерно равен $\delta(\Delta F) = 0.41F$ и может быть достигнут для большеразмерных высококачественных сверхпроводящих плёнок: В случае, когда частота измерительного генератора $F_{\text{изм}} = 10$ МГц, максимальный ожидаемый эффект примерно равен $\delta(\Delta F)_{\text{макс}} = 4$ МГц. Нами экспериментально получен результат $\delta(\Delta F)_{\text{эксп}} = 2$ МГц для плёнок достаточно хорошего качества. Для сравнения отметим, что в случае объёмной цилиндрической катушки при той же частоте измерительного генератора $F_{\text{изм}} = 10$ МГц эффект составлял $\delta(\Delta F) = (20-200)$ Гц в зависимости от расположения плёнки в катушке. Таким образом, при использовании плоской катушки эффект на 4-5 порядков больше. Такой результат можно объяснить тем, что в случае объёмной катушки коэффициент её заполнения ВТСП плёнкой очень мал из-за малого отношения объёма плёнки, из которого вытесняется измерительное РЧ

поле, к объёму подложки. Вследствие этого при сверхпроводящем фазовом переходе плёнки распределение РЧ поля в окрестности плёнки внутри объёмной катушки существенно не искажается. В противоположность этому, при использовании плоской катушки на той её стороне, где находится ВТСП плёнка, силовые линии измерительного РЧ поля при фазовом переходе плёнки существенно искажаются. Мы считаем, что именно это превосходство в чувствительности предлагаемых детекторов, основанных на ВТСП материалах с использованием открытых плоских катушек, может оказаться принципиально важным для разработки будущих детекторов частиц и излучений.

Предварительные экспериментальные исследования привели нас к заключению, что даже на сегодняшней, столь предварительной стадии развития этих детекторов принципиально нового класса на ВТСП (по сути дела, их можно именовать "экранирующими" детекторами) по своим техническим возможностям они уже приближаются к ныне действующим гелиевым сверхпроводниковым детекторам элементарных частиц и ионизирующих излучений. Достигнутая уже сегодня на этих детекторах чувствительность, например, к лазерному излучению с длиной волны 0,63 мкм или к естественному дневному свету имеет порядок 10^{-9} – 10^{-10} Вт/см²/Гц^{1/2}. При этом эффект болометрический, с характерным временем регистрации порядка нескольких секунд. Быстродействие порядка 10^{-5} – 10^{-6} сек достигнуто при регистрации изменений величин приложенных постоянных магнитных полей или токов, пропущенных через ВТСП плёнки. Это, по-видимому, обусловлено нетепловым характером разрушения куперовских пар магнитным полем или токами, протекающими в ВТСП плёнках. При этом быстродействие в первом приближении ограничивается частотой измерительного генератора ($F_{изм}=10$ МГц). Как показывают наши экспериментальные оценки, при соответствующем усовершенствовании эти детекторы могут иметь и лучшие параметры. На самом деле, существует множество реальных и вполне реализуемых возможностей для дальнейшего улучшения их параметров. Среди них главными являются:

1. Оптимизация технологии приготовления ВТСП плёнок разных составов для создания чувствительных элементов для детекторов

"экранирующего" типа с максимально возможным значением скин-глубины и одновременно, по возможности, с минимальной глубиной проникновения слабых магнитных полей в сверхпроводник.

2. Выбор оптимальной толщины ВТСП плёнки в зависимости от частоты тестирующего РЧ поля и, что более критично, в зависимости от глубины проникновения детектируемого ионизирующего излучения в глубину плёнки.

3. Уменьшение толщины подложек для увеличения болометрического эффекта. Предельный случай – вискаяя плёнка или плёнка без подложки. Ожидаемый при этом болометрический (тепловой) эффект будет максимальным.

4. Особое внимание должно уделяться разносторонним исследованиям ВТСП тонкоплёночных микромостиков в токонесущих режимах и при разных постоянных магнитных полях как возможных быстродействующих чувствительных элементов для детекторов "экранирующего" типа. Это позволит выявить истинные временные характеристики предложенных детекторов.

5. Исследование возможности существования оптимального режима работы детекторов "экранирующего" типа в зависимости от величины приложенного магнитного поля и рабочей температуры (аналогично тому, что было обнаружено ранее в детекторах на перегретых сверхпроводящих гранулах (ПСГ) [11]).

6. Использование детектирующей техники, основанной на открытых плоских катушках для усовершенствования параметров некоторых ныне действующих гелиевых детекторов (например, детекторов на ПСГ, а также полосковых детекторов [16-17]).

Предложенные нами детекторы являются бесконтактными. При необходимости возможно их пикселирование, т.е. создание матрицы, состоящей из регулярно расположенных на поверхности ВТСП плёнки большого количества открытых, плоских катушек, размерами в несколько десятков микрон каждая, являющихся резонансными контурами независимо действующих генераторов на ТД или одного быстро переключаемого генератора.

В настоящее время нами экспериментально проверяется работоспособность вышепредложенных идей и выявляются новые

практические возможности этих детекторов. Результаты этих исследований будут опубликованы позднее.

Данная работа частично поддержана грантом Meyer Foundation, присуждённым Американским Физическим Обществом (APS 57-DCMP 03/22/93), грантом US SOP №00014-96-1-0417, а также Армянским фондом фундаментальных исследований под грантом №94-737. Авторы глубоко признательны А.М. Гуляну и Д. Ван Вехтен (US Naval Research Laboratory) за многостороннюю поддержку этих исследований и полезные замечания. Мы благодарны также С.С. Терзяну за обсуждение работы, В.Т. Татояну за помощь в экспериментальных исследованиях и Г.М. Манукян за помощь при оформлении данной публикации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter. Eds. K. Pretzl, N. Schmitz, and L. Stodolsky. Berlin, "Springer-Verlag", 1987.
2. Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter II. Eds. L. Gonzalez-Mestres and D. Perret-Gallix. Gif-sur-Yvette, France, "Editions Frontieres", 1988.
3. Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter III. Eds. L. Brogiato, D.V. Camin, and E. Fiorini. Gif-sur-Yvette, France, "Editions Frontieres", 1989.
4. Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter IV. Eds. N.E. Booth and G.L. Salmon. Gif-sur-Yvette, France, "Editions Frontieres", 1992.
5. Proc. 5th Int. Workshop on Low Temp. Detectors LTD5, Berkeley, CA, 1993, published in J. Low Temp. Phys., 93, №3/4 (1993).
6. Proc. 6th Int. Workshop on Low Temp. Detectors LTD6, Beatenberg/Interlaken, Switzerland, 1995, published in Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research A, 370, №1, 1-286 (1996).
7. N.E. Booth and D.J. Goldie. OUNP-96-09, University of Oxford (см. также "Superconductor Science and Technology, 9, 493 (1996)).
8. F.A. Miranda, W.L. Gordon, K.B. Bhasin, V.O. Heinen, and J.D. Warner. J. Appl. Phys., 70, 5450 (1991).
9. E.A. Lynton. Superconductivity. London, "Methuen and Co. Ltd", 1969.
10. Э.А. Канер, В.Ф. Гантмахер. УФН, 94, 193 (1968).
11. S.G. Gevorgyan. Modern Physics B, 9, №13/14, 1575 (1995).
12. S.G. Gevorgyan. Proc. of the Toledo Int. Workshop on "Superconductivity and Particle detection", Singapore, p.45, 1995.
13. С.Г. Геворгян, Г.Д. Мовсисян, М.А. Арутюнян, В.Т. Татоян, А.А. Мовсисян. ПТЭ, №2, 88 (1995).
14. S.G. Gevorgyan, G.D. Movsesyan, V.T. Tatoyan, A.A. Movsisyan, A.L. Gyulamiryan, and H.G. Shirinyan. Rev. Sci. Instrum., 1997 (accepted for publication).
15. C.T. Van Degrieff and D.P. Love. Rev. Sci. Instrum., 52, 712 (1981) (см. также 46, 599 (1975)).
16. V. Jeudy, G. Jung, D. Limagne, G. Waysand. Physica B, 194-196, 1597 and 1785 (1994).
17. V. Jeudy, D. Limagne, W. Poirier, and G. Waysand. Physica B, 194-196, 1599 (1994).

IMPLEMENTATION OF HIGH- T_c SUPERCONDUCTORS FOR CREATION OF NEW TYPE DETECTORS OF PARTICLES AND RADIATION

S.G. GEVORGYAN, G.D. MOVSESYAN, A.A. MOVSISYAN, A.L. GYULAMIRYAN,
V.A. SHINDYAN, and H.G. SHIRINYAN

Some aspects of High- T_c superconductivity (HTSC), which may be successfully applied to the detection of particles and radiation are discussed. The perspectives of creation of radically new type detectors of particles and radiation, based on HTSC materials are considered. Capabilities of these detectors are evaluated and real directions of further essential improvement of their parameters are suggested.

ԲԱՐՁՐՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԳԵՐՀԱՂՈՐԴԻՉՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ
ՍԱՆԻԿՆԵՐԻ ՈՒ ՃԱՌԱԳԱՅԹՈՒՄՆԵՐԻ ՆՈՐ ԴԱՍԻ
ԴԵՏԵԿՏՈՐՆԵՐԻ ՍՏԵՂԾՄԱՆ ՀԱՍՄԱՐ

Ս.Գ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Գ.Դ. ՄՈՎՍԵՍՅԱՆ, Ա.Ա. ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ, Ա.Լ. ԳՅՈՒԼԱՄԻՐՅԱՆ,
Վ.Ա. ՇԻՆԴՅԱՆ, Հ.Գ. ՇԻՐԻՆՅԱՆ

Զննարկված են բարձրջերմաստիճանային գերհաղորդիչների (ԲՋԳՀ) ֆիզիկական հատկությունների, որոշ առանձնահատկություններ, որոնք կարող են հաջողությամբ օգտագործվել տարրական մասնիկների ու իոնացնող ճառագայթումների դետեկտման համար: Դիտարկված են ԲՋԳՀ նյութերի հիման վրա գործող սկզբունքներն ու դրանից գերհաղորդիչ դետեկտորների ստեղծման հեռանկարները: Գնահատված են այդ դետեկտորների ապագա հնարավորություններն ու նշված են դրանց էապես կատարելագործման հետագա ուղղությունները: