

УДК 621.373

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОГЕНЕРАТОРОВ НА ТУННЕЛЬНОМ ДИОДЕ, АКТИВИРОВАННЫХ НА ВНУТРЕННЕЙ ЕМКОСТИ СВОЕЙ КАТУШКИ

С.Т. МУРАДЯН¹, С.Г. ГЕВОРГЯН^{1,2}

¹Ереванский государственный университет, Армения

²Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 12 ноября 2007 г.)

Проведено сравнение двух генераторов на туннельном диоде, имеющих катушку цилиндрической формы и плоскую, однослойную катушку необычной формы, работающих соответственно на частотах 6–25 МГц и 8–24 МГц (сравниваемые катушки имели одинаковые индуктивности). Они запускались как без, так и со внешней емкостью в их резонансном контуре, т.е. изученные генераторы активировались также и на их внутренних (собственных) емкостях C_K . Более стабильные колебания удалось получить на плоских катушках. Анализ данных позволяет считать, что это является следствием относительно большой величины собственной емкости такой катушки по сравнению с ее паразитной емкостью C_{par} по отношению к окружению. Этим и обусловлены преимущества генераторов на плоских катушках. По данным измерений определены индуктивность и величина $C_K + C_{\text{par}}$ для обеих катушек.

Благодаря тому, что частоту колебаний можно измерить с большой точностью, автогенераторы давно считаются одними из наиболее прецизионных приборов. Среди них особое место занимают генераторы МГц-овых частот, имеющие цилиндрические катушки, активированные маломощными обращенными (backward) туннельными диодами (ТД) (см. работы [1,2] и ссылки в них). Замена такой катушки плоской, однослойной, в качестве приемного контура автогенератора [3], на 3-4 порядка улучшает разрешение измерений – особенно при изучении пластинчатых высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), что оказалось важным этапом улучшения возможностей этого метода исследования. Усовершенствованный метод позволил обнаружить очень слабо выраженные (но имеющие принципиальное значение для понимания истинной природы ВТСП) новые свойства сверхпроводящего (СП) состояния, особенно в самом начале его формирования [4-8], что привело к появлению новых идей в этой области науки [9]. Такая техника уже проявила себя с лучшей стороны и в применениях [10]. В частности, с наибольшим относительным разрешением (более чем в 6 порядков) сегодня удается

исследовать СП фазовый переход именно с помощью стабильного по частоте и амплитуде автогенератора, имеющего плоскую, однослойную приемную катушку (ПОК), активированную туннельным диодом малой мощности ($< 1 \text{ мкВт}$) [2,3].

Таким образом, дальнейшее усовершенствование генераторов на ПОК путем изучения как особенностей технологии изготовления плоских катушек малых размеров, так и особенностей конструкции генератора в целом, является важной исследовательской задачей.

С этой целью, в данной работе были созданы два автогенератора – с плоской и цилиндрической катушками, соответственно, которые были запущены также и без наружной емкости C_0 в их колебательном контуре (см. обозначения ниже). Иначе говоря, благодаря высокой добротности использованных катушек (60–200), генераторы удалось активизировать даже на собственных (внутренних) емкостях этих катушек, чего добиться было несравнимо труднее в случае приёмной катушки цилиндрической формы. Анализ результатов проведённых нами экспериментов выявляет причину этого, на первый взгляд, странного обстоятельства, что придаёт ряд существенных преимуществ измерительным генераторам на плоских катушках перед обычной техникой с катушками цилиндрической формы.

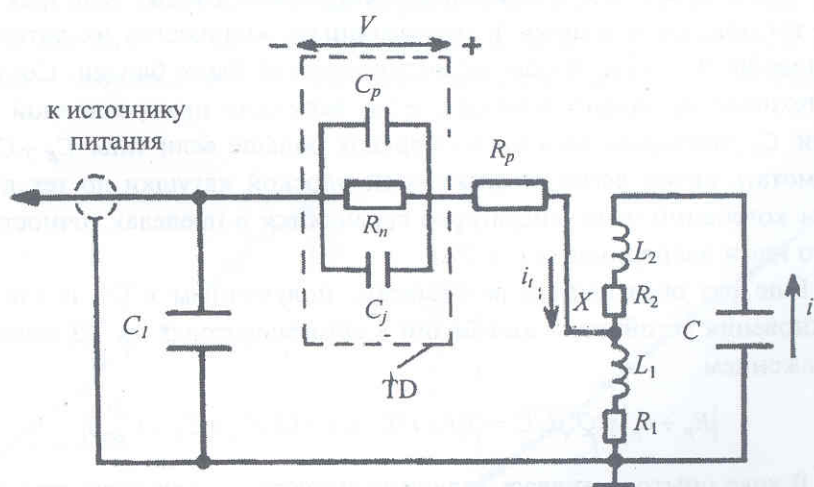


Рис.1. Эквивалентная РЧ схема генератора на ТД. В этой схеме C_j – барьерная емкость, $|R_n|$ – дифференциальное сопротивление вольт-амперной характеристики ТД, C_p – емкость диода на корпус. Сопротивление R_p служит для подавления паразитных ВЧ колебаний ($R_p \ll |R_n|$), а X является коэффициентом включения контура ($0 \leq X \leq 1$).

На рис.1 показана эквивалентная радиочастотная (РЧ) схема созданных генераторов. Для расчета частоты колебаний этих генераторов воспользуемся формулой, полученной в [2]:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_0 L}{Q} b_1 + \dots \right], \quad (1)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ есть циклическая частота невозмущенного образцом колебательного контура, $Q = (1/R)\sqrt{L/C}$ является добротностью этого контура (R характеризует потери в самом контуре), а b_1 есть крутизна участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением вольт-амперной характеристики туннельного диода (активного элемента генератора).

Далее, введем обозначения $L = L_1 + L_2 \equiv L_K$, $C \equiv C_0 + C_K + C_{\text{par}}$, где C_0 — емкость, прикрепленная к катушке снаружи, C_{par} — емкость катушки, обусловленная паразитным окружением, C_K и L_K — собственные емкость и индуктивность катушки, а C — полная (суммарная) емкость колебательного контура. С учетом этих обозначений, с точностью примерно 1–2% [2] формулу (1) можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{F^2(C_0)} = 4\pi^2 L_K (C_0 + C_K + C_{\text{par}}). \quad (2)$$

Далее, опытным путем построив зависимость линейной функции $1/F^2 = f(C_0)$ от C_0 как параметра эксперимента, можно а) найти суммарное значение величины $C_K + C_{\text{par}}$ по точке пересечения функции $f(C_0)$ с осью C_0 и б) оценить собственную индуктивность катушки L_K по углу наклона этой линейной зависимости.

Чтобы сравнение генераторов с катушками разных конструкций считалось технически разумным и осмысленным, количество их витков нужно было подобрать таким, чтобы их индуктивности были близки. Согласно (2), этого технически можно добиться, если величину прикреплённой снаружи емкости C_0 подобрать хотя бы на порядок больше величины $C_K + C_{\text{par}}$, а затем отмотать витки легко отматываемой плоской катушки до тех пор, пока частоты колебаний этих генераторов сравниваются в пределах точности проведенного нами эксперимента (~1–2%).

Еще раз обратимся к результатам, полученным в [2], и для условия возникновения устойчивых колебаний в автогенераторах на ТД воспользуемся выражением

$$|R_p + R_n| \leq Q\sqrt{L/C} = (1/R)(L/C) = L / [R(C_0 + C_K + C_{\text{par}})]. \quad (3)$$

В ходе опытов менялась величина ёмкости C_0 как параметра эксперимента: она варьировалась от максимально возможного значения $C_{0\text{max}}$ (при которой еще удавалось сохранить условие генерации (3)) до $C_0 = 0$. Отметим, что при $C_0 = 0$ в генераторах с цилиндрической катушкой практически редко удавалось обеспечить условие (3) и добиться стабильных по частоте колебаний (а если и удавалось, то только на очень добротных катушках). Вопреки этому, в генераторах, имеющих технически намного более сложные по конструкции и к тому же менее добротные (из-за открытости такой катушки ее измерительное РЧ поле рассеяно вокруг нее, вследствие чего растут потери энергии этого поля в окружающем пространстве) катушки плоской формы, даже при отсутствии ёмкости C_0 практически на всех ка-

тушках удавалось получить стабильную генерацию – по крайней мере это проверено нами на частотах 1–30 МГц. Это обстоятельство кажется странным, особенно, если исходить из условия возбуждения генерации (3), согласно которому стабильные колебания должны легче возникать на более добротных катушках, какими являются катушки цилиндрической формы. Ответ и на этот вопрос, в частности, мы намеревались получить, предпринимая лет десять тому назад первые шаги, направленные к созданию маломощных автогенераторов на приемных катушках плоской, однослойной геометрии [2].

Построенные опытным путем графики функции $1/F^2 = f(C_0)$ для двух генераторов приведены на рис.2а (плоская катушка) и рис.2б (цилиндрическая катушка). Квадратные точки соответствуют данным опыта, а прямые линии – расчету (аппроксимация измеренных данных методом наименьших квадратов). Отклонения опытных данных от линий аппроксимации на графиках обусловлены, в основном, точностью определения C_0 (значения, указанные на слюдяных конденсаторах типа КСО, по ГОСТу СССР имели ошибку ~5–10%).

Суммарная величина собственной (внутренней) и паразитной емкостей катушек была численно определена точкой пересечения соответствующей линии аппроксимации с осью C_0 . Для плоской катушки она составила $C_K + C_{\text{par}} = (31 \pm 2.5)$ пФ (с точностью порядка 8% – рис.2а). А в случае цилиндрической катушки эту же величину удалось из опытов определить с худшей точностью – порядка 40%, и она оказалось равной $C_K + C_{\text{par}} = (26 \pm 10)$ пФ (рис.2б).

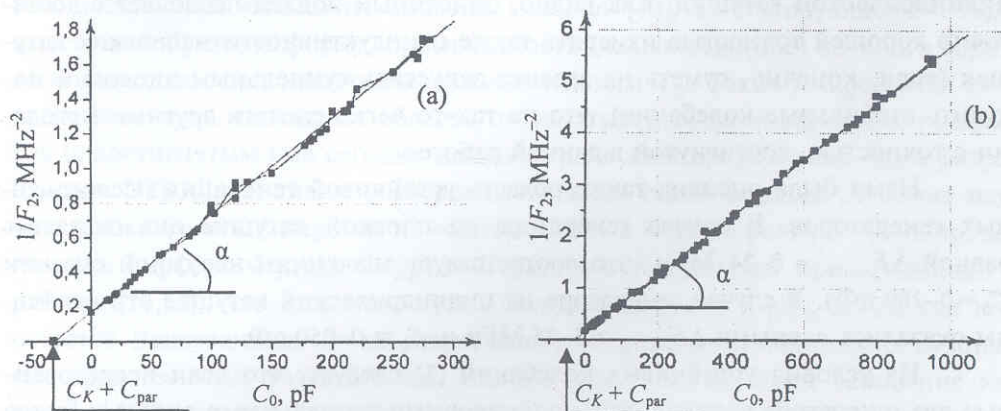


Рис.2. Зависимость функции $1/F^2$ от емкости C_0 , подключенной к резонансному контуру: (а) плоская катушка – $C_K + C_{\text{par}} = (31 \pm 2.5)$ пФ, $C_{0 \text{ max (плоск.)}} = 280$ пФ, (б) цилиндрическая катушка – $C_K + C_{\text{par}} = (26 \pm 10)$ пФ, $C_{0 \text{ max (цилиндр.)}} = 950$ пФ. Функции $Y_{(a)} = 0.17475 + 0.00562X$ и $Y_{(b)} = 0.14678 + 0.00554X$ представляют собой линейные аппроксимации (методом наименьших квадратов) измеренных данных, соответственно, для зависимостей, приведенных на графиках (а) и (б). Угол наклона этих прямых связан с индуктивностью катушек L_K по формуле $\text{tg} \alpha = 4\pi^2 L_K$.

Исходя из достаточно высокой стабильности частоты колебаний гене-

ратора с плоской катушкой (при $C_0 = 0$, когда генерация возникает на собственной емкости C_K , стабильность на частоте $F = 24.2721$ МГц составляла $\Delta F_{\text{стаб.}} \approx \pm 50$ Гц, а при $C_0 = 60$ пФ $\Delta F_{\text{стаб.}} \approx \pm 10$ Гц на частоте $F = 14.0142$ МГц), можно предположить, что паразитная емкость плоской катушки C_{par} составляет малую часть измеренной суммарной величины $C_K + C_{\text{par}} \approx 31$ пФ. Вопреки этому, близкий по своим РЧ параметрам к генератору на плоской катушке генератор с цилиндрической катушкой намного труднее запустить без добавленной к ней емкости C_0 , а если это иногда удается, то стабильность на порядок хуже. Поэтому можно полагать, что в случае цилиндрической катушки емкость C_{par} составляет заметную долю суммарной емкости $C_K + C_{\text{par}} \approx 26$ пФ, что, по-видимому, является главным мешающим обстоятельством для удовлетворения вышеприведенного условия (3) для генерации стабильных колебаний.

С другой стороны, линейные зависимости данных измерений, показанных на рис.2а,б, свидетельствуют о том, что аддитивное обозначение $C \equiv C_0 + C_K + C_{\text{par}}$ оправдано опытом. Иначе говоря, в РЧ схеме генераторов внутренняя емкость катушки C_K , ее паразитная емкость C_{par} и наружная емкость C_0 соединены друг с другом параллельно.

Исходя из величин наклонов расчетных линий, приведенных на рис.2а,б, нами были определены также индуктивности исследованных катушек по формуле $L_K = (1/4\pi^2) \text{tg} \alpha$. С пятипроцентной точностью (обусловленной, в основном, ошибками определения величин C_0) они оказались равными $L_K = (1.425 \pm 0.07)$ мкГн для плоской катушки и $L_K = (1.40 \pm 0.07)$ мкГн для цилиндрической катушки. Как видно, описанный подход позволяет с достаточно хорошей точностью измерять также и индуктивности маленьких катушек (если, конечно, суметь их заранее запустить туннельным диодом и получить стабильные колебания), что не так-то легко сделать другими методами с точностью, достигнутой в данной работе.

Нами была оценена также область устойчивой генерации исследованных генераторов. В случае генератора на плоской катушке она оказалась равной $\Delta F_{\text{уст.ген.}} = 8-24$ МГц (что соответствует значениям наружной емкости $C_0 = 0-280$ пФ). В случае генератора на цилиндрической катушке эти величины оказались равными $\Delta F_{\text{уст.ген.}} = 6-25$ МГц и $C_0 = 0-950$ пФ.

Из условия устойчивых колебаний (3) следует, что если исследованные два генератора активированы одинаковыми туннельными диодами (тогда дифференциальное сопротивление $|R_p + R_n| \equiv |R_n|$ у таких идентичных активных элементов должно быть примерно одинаковым), то добротности резонансных контуров (приемных катушек) этих генераторов относятся как

$$Q_{\text{плоск.}}/Q_{\text{цилинд.}} = \sqrt{C_{0 \text{ max (плоск.)}}} / \sqrt{C_{0 \text{ max (цилинд.)}}} , \quad (4)$$

где $C_{0 \text{ max (плоск.)}}$ и $C_{0 \text{ max (цилинд.)}}$ есть максимальные значения емкости C_0 , припаянной к плоской и цилиндрической катушкам, соответственно, при которых еще существует генерация.

Тогда из (4) нетрудно убедиться, что добротность цилиндрической катушки почти в 2 раза больше добротности плоской, имеющей ту же индуктивность, что и цилиндрическая – что вовсе не является неожиданностью. из-за открытости плоской катушки ее РЧ измерительное поле рассеяно вокруг нее, вследствие чего растут потери энергии этого поля в окружающем ее пространстве. Кроме того, омическое сопротивление плоской катушки также намного больше сопротивления цилиндрической, поскольку она намотана медной проволокой с гораздо меньшим диаметром – при почти той же длине. Это и есть основные причины, приводящие к снижению добротности плоских катушек. И тогда тот необычный факт, что на собственной (внутренней) емкости приемной катушки намного легче запустить генератор с плоской катушкой, чем с цилиндрической, может явиться следствием относительно большой величины емкости C_K плоской катушки по сравнению с ее паразитной емкостью C_{par} к окружению – вопреки тому, что свойственно цилиндрическим катушкам. Иначе говоря, в случае цилиндрических катушек C_{par} составляет заметную долю суммарной емкости $C_K + C_{\text{par}}$, что, по-видимому, и является мешающим обстоятельством для удовлетворения условия (3) при генерации устойчивых колебаний в автогенераторе с цилиндрическими катушками.

В заключение отметим, что на основе генераторов, действующих на емкости C_K собственной катушки, можно разработать новый подход к зондированию свойств поверхности предметов, с использованием плоской катушки [11], что позволит создать микроскопы нового поколения, наделенные дальнедействующими свойствами. Благодаря необычным свойствам таких (так называемых «магнитно-полевых») зондов [12], их тестирующее РЧ поле имеет иглообразную форму, протяженность (дальнедействие) которого гораздо больше, чем при наличии наружной емкости C_0 . Такие микроскопы позволят различать магнитные области от немагнитных на поверхности предметов (с достигнутым уже сегодня микрометрическим пространственным разрешением [12]). Дальнейшее усовершенствование такой техники позволит изучить также фазовый переход из «однородной» в «неоднородную» сверхпроводимость (эффект Фульда–Феррела–Ларкина–Овчинникова, предсказанный в работах [13,14]), что опытным путем было обнаружено в [15], но до сих пор остается неизученным из-за отсутствия измерительной техники с нужным пространственным разрешением. Однако наши оценки дают основание надеяться [16], что если создать измерители на плоских катушках с наружным диаметром меньше 1 мм (что уже не проблема для компаний [17]), то такая техника будет обладать достаточным пространственным разрешением для решения и этой важной задачи. Она поможет также исследовать не менее тонкое явление сосуществования сверхпроводимости и магнетизма, обнаруженное экспериментально только в объемах субмикронных размеров [18] и до сих пор малоизученное также из-за отсутствия техники с нужным пространственным разрешением.

Данная работа поддержана грантами NFSAT-CRDF № ISIPA 01-04 и

ЛИТЕРАТУРА

1. C.Van Degrift, D.Love. Rev. Sci. Instrum., **52**, 712 (1981).
2. S.G.Gevorgyan, G.D.Movsesyan, A.A.Movsisyan, et al. Rev. Sci. Instr., **69**, 2550 (1998).
3. S.G.Gevorgyan, T.Kiss, A.A.Movsisyan, et al. Rev. Sci. Instrum., **71**, 1488 (2000).
4. S.G.Gevorgyan, T.Kiss, T.Ohyama, et al. Supercond. Sci. Technol., **14**, 1009 (2001).
5. S.G.Gevorgyan, T.Kiss, H.G.Shirinyan, et al. Physica C, **363**, 113 (2001).
6. S.G.Gevorgyan, T.Kiss, M.Inoue, et al. Physica C, **378-381**, 531 (2002).
7. С.Г.Геворгян. Изв. НАН Армении, Физика, **38**, 50 и 123 (2003).
8. S.G.Gevorgyan. Supercond. Sci. Technol., Ref.: SUST/260572/PAP/180488 (2007) – submitted.
9. Д.М.Седракян. Изв. НАН Армении, Физика, **40**, 81 (2005).
10. S.G.Gevorgyan et al. IEEE Trans. on Appl. Supercond., **17**, 629 (2007).
11. S.G.Gevorgyan, M.H.Azaryan. Proc. 5-th Int. Conf. on Semiconductor Micro- & Nano-Electronics, Aghveran, Armenia, 2005, pp.82-86.
12. S.G.Gevorgyan, M.H.Azaryan. Rev. Sci. Instrum. (2007) – to be submitted.
13. P.Fulde, R.A.Ferrell. Phys. Rev., **135A**, 550 (1964).
14. A.I.Larkin, Y.N.Ovchinnikov. Soviet Phys. JETP, **20** 762 (1964).
15. H.Radovan, S.Tozer, T.Murphy, et al. NHMFL Reports, **10**, no.3, 1 (2003) – www.magnet.fsu.edu.
16. S.Gevorgyan, H.Shirinyan, E.Sharoyan, M.Takeo, et al. NIM-A, **520**, 314 (2004).
17. Spiral Chip Inductors (U.S. Microwaves production – www.usmicrowaves.com).
18. D.Aoki, A.Huxley, et al. Nature, **413**, 613 (2001).

ԻՐ ԿՈՃԻ ՆԵՐՔԻՆ ՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ԹՈՒՆԵԼԱՅԻՆ ԴԻՈԴՈՎ ԱԿՏԻՎԱՑՎԱԾ ԻՆՔՆԱԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ

Ս.Տ. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ, Ս.Գ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

Կատարված է 6–25 ՄՀց տիրույթում աշխատող զվանային կոճով և 8–24 ՄՀց տիրույթում աշխատող միաշերտ, հարթ տեսքի անսովոր կոճով և թունելային դիոդով ակտիվացվող երկու ինքնագեներատորների համեմատում: Համեմատվող կոճերն ունեն միատեսակ ինդուկտիվություններ: Դրանք ակտիվացվել են իրենց ռեզոնանսային կոնտուրում ինչպես արտաքին C_0 ունակությամբ առկայության, այնպես էլ դրա բացակայության հանգամանքներում: Այլ կերպ ասած՝ հետազոտվող գեներատորներն ակտիվացվել են մալ միայն իրենց ներքին (սեփական) C_K ունակությամբների վրա: Առավել կայուն գեներացիա հաջողվել է ստանալ հարթ կոճերի վրա:

INVESTIGATION OF TUNNEL-DIODE OSCILLATORS ACTIVATED ON THE INTERNAL CAPACITANCE OF THEIR COILS

S.T. MURADYAN, S.G. GEVORGYAN

Tunnel-diode oscillators with an unusual single-layer flat geometry and with a solenoid pick-up coils are compared. They operate in the frequency ranges 8–24 MHz and 6–25 MHz, correspondingly. We could activate the oscillators both with an external capacitance C_0 in their circuit and without it. Otherwise, we could activate oscillators also on their internal capacitances C_K . Much more stable oscillations were achieved on flat-geometry coils. Analysis of test-data indicates that this is due to larger value of the internal capacitance C_K of a flat coil as compared to its parasitic capacitance C_{par} with respect to the environment.